

VŠB – Technická Univerzita Ostrava
Fakulta Elektrotechniky a Informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2016/2017

Ondřej Hub

VŠB – Technická Univerzita Ostrava
Fakulta Elektrotechniky a Informatiky
Katedra elektroenergetiky

Jednopolové poruchy v síti vn a nn
Single phase faults in MV and LV networks

2016/2017

Ondřej Hub

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student:

Ondřej Hub

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907R001 Elektroenergetika

Téma:

Jednopolové poruchy v síti vn a nn.
Single phase faults in MV and LV networks.

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Popis kabelových i venkovních sítí nn a vn
2. Teoretický rozbor vzniku jednopolových poruch
3. Možnosti kompenzace zemních kapacitních proudů
4. Možnosti lokalizace místa zemního spojení
5. Příklad výpočtu

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Santarius, P.: Elektrické stanice a vedení, Skripta VŠB-TU Ostrava, 1990
2. Hodinka, M.: Přenos a rozvod elektrické energie, SNTL, 1989
3. Trojáněk, Z.: Přechodné jevy v elektrizačních soustavách, SNTL 1987
4. Dohnálek, P.: Ochrany pro průmysl a energetiku, SNTL, 1991
5. Toman, P.: Lokalizace místa zemního spojení v sítích VN, Brno, 2002

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

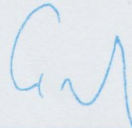
Vedoucí bakalářské práce: **doc. Dr. Ing. Jiří Gurecký**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 28. 4. 2017

Podpis autora:



Poděkování

Velice děkuji svému vedoucímu doc. Dr. Ing. Jiřímu Gureckému za rady a připomínky, které jsem od něj obdržel v průběhu vypracovávání bakalářské práce.

Abstrakt

První část bakalářské práce pojednává o vlastnostech, zejména elektrických, venkovního a kabelového vedení nn a vn sítí. Tyto parametry jsou závislé na použitých materiálech, konstrukci, rozměrech a prostředí ve kterém se vedení nachází. Ve druhé části jsou rozebírány jednopólové poruchy, konkrétně jaké druhy existují, jak k nim dojde a jaké důsledky to má pro elektrizační soustavu ve které porucha nastala. Třetí část se zabývá kompenzací zemních poruchových proudů kapacitního charakteru vznikajících při jednopólových poruchách. Poslední teoretická část se zabývá určením postižené části vedení a také přímou lokalizací místa poruchy pomocí řady různých metod. Následuje poté část praktická, kde je vypočítán poruchový proud při zemním spojení a při zkratu.

Klíčová slova

zkrat, zemní spojení, kompenzace zemních kapacitních proudů, lokalizace místa zemního spojení

Abstract

The first part of the bachelor thesis is about properties, mostly electrical, of outdoor and cable lines of LV and MV networks. These properties are dictated by the used materials, construction, dimensions and environmental influences. The second part analyzes faults, specifically what types exist, reasons why they occur and what consequences they cause to the electrical network. The third part is dedicated to capacitive currents generated by single phase faults and the means of their compensation. The last theoretical part is devoted to describing various means of locating the faulty line and the specific location of the fault, using various different methods. In the following practical part, an example of short-circuited network and a network with ground fault is solved mathematically.

Key Words

short-circuit, ground fault, ground fault current compensation, fault location in electrical network

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	9
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	11
1. Úvod	12
2. Popis kabelových i venkovních sítí nn a vn	13
2.1. Venkovní vedení	13
2.2. Kabelové vedení	20
3. Teoretický rozbor vzniku jednopólových poruch	23
4. Možnosti kompenzace zemních kapacitních proudů	28
4.1. Síť s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku	28
4.2. Síť s uzlem uzemněným přes odporník	30
5. Možnosti lokalizace místa zemního spojení	32
5.1. Statické metody	32
5.1.1. Metody pro izolované soustavy	32
5.1.2. Metody pro kompenzované soustavy	33
5.2. Dynamické metody	38
5.3. Lokalizace poruchy	41
5.4. Detekce a lokalizace poruchy v sítích uzemněných přes odporník	43
6. Výpočet	45
7. Závěr	49
Literatura:	50

Seznam použitých symbolů a zkratek

Al	chemická značka hliníku
Cu	chemická značka mědi
Fe	chemická značka železa
IZP	indikátor zkratového proudu
nn	nízké napětí
SPT	snímací transformátor proudu
vn	vysoké napětí
vvv	velmi vysoké napětí

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Průřez kombinovaným lanem AlFe	14
Obr. 2.2: Průřez závěsným kabelem	14
Obr. 2.3: Průběh trojfázového proudu	17
Obr. 2.4: Nesymetrické vedení bez uvažování vlivu země	19
Obr. 2.5: Nesymetrické vedení s uvažováním vlivu země	19
Obr. 2.6: Kapacita stíněných a trojplášťových kabelů	22
Obr. 2.7: Kapacity kabelů se společným pláštěm	22
Obr. 3.1: Trojfázový zkrat	23
Obr. 3.2: Dvofázový zkrat	23
Obr. 3.3: Dvofázový zemní zkrat	24
Obr. 3.4: Jednofázový zkrat	24
Obr. 3.5: Schématické znázornění jednofázového zkratu	25
Obr. 3.6: Propojená náhradní schémata složkových soustav	25
Obr. 3.7: Schématické znázornění sítě s izolovanou nulou při zemním spojení	26
Obr. 3.8: Fázorový diagram soustavy bez kompenzace (zemní spojení v bodě A)	27
Obr. 4.1: Schématické znázornění vlivu tlumivky	28
Obr. 4.2: Fázorový diagram soustavy s kompenzací tlumivkou (zemní spojení v bodě A)	29
Obr. 4.3: Schématické znázornění vlivu činného odporu	30
Obr. 4.4: Fázorový diagram soustavy s kompenzací odporníkem (zemní spojení v bodě A)	31
Obr. 5.1: Příklad charakteristiky wattmetrického článku	34
Obr. 5.2: Způsob funkce admitanční metody	35
Obr. 5.3: Příklad pracovní charakteristiky admitanční metody	35
Obr. 5.4: Pracovní charakteristika přírůstkového konduktančního článku	37
Obr. 5.5: Oscilografický průběh netočivé složky proudu a napětí při zemním spojení na postiženém vedení	39
Obr. 5.6: Oscilografický průběh netočivé složky proudu a napětí při zemním spojení na nepostiženém vedení	39
Obr. 5.7: Příklad q_u – diagramu tří vývodů v případě nízkoodporové poruchy na vývodu q_{oA} (q_{oB} a q_{oC} nepostižené)	40
Obr. 5.8: q_{u2} – diagram si korektní identifikací postiženého vývodu q_{u2} a nepostiženého vývodu q_{u4}	40
Obr. 5.9: Indikátor poruch ukotvený k fázovému vodiči	42
Obr. 5.10: Lokalizace místa zemního spojení pomocí signalizace indikátoru poruch	42

Obr. 5.11: Princip lokalizace pomocí indikátoru poruch v kabelové síti	43
Obr. 5.12: Správná a chybná instalace měřicího transformátoru proudu na kabelové vedení	44
Obr. 6.1: Schéma řešené sítě	46
Obr. 6.2: Vlevo – náhradní schéma sousledné a zpětné složky, vpravo – náhradní schéma nulové složky	47

Seznam tabulek

Tab. 2.1: Teplotní činitelé odporu a měrný odpor	15
Tab. 6.1: Katalogová data použitého kabelu	45

1. Úvod

Základem elektrizační soustavy jsou přenosové soustavy, která operují s velmi vysokým napětím (vvn). Účelem těchto sítí je přenést elektrickou energii od výrobců (elektrárny) do elektrických stanic, kde je tato energie transformována na nižší napěťové úrovně a pomocí distribučních sítí poté dodávána jednotlivým odběratelům. V ČR se za vvn považuje napětí od 52 kV výše. Napěťové hladiny, které se v přenosových sítích používají jsou 400 kV, 220 kV a částečně i 110 kV.

Distribuční sítě pracují na hladinách vysokého (vn) a nízkého napětí (nn). Tyto sítě mají za úkol dodávat elektřinu do domácností, podniků atp. V ČR se vn pohybuje od 52 kV do 1 kV a nn od 1000 V (1 kV) do 50 V. Nejčastěji užívané distribuční hladiny vn sítí jsou 35 kV, 22 kV a částečně i 110 kV. Méně často se také používají napětí 10 kV a 6 kV. V sítích nn se nejčastěji používá napětí o velikosti 230/400 V.

Provoz elektrizačních soustav není jednoduchá záležitost a mohou při něm vznikat poruchy, které mohou být nebezpečné připojeným zařízením nebo lidskému životu. Příčiny mohou být různé, od povětrnostních vlivů (např. úder blesku) po lidskou chybu způsobenou nedbalou obsluhou. Nejčastější poruchy zahrnují různé druhy zkratů, přepětí a zemních spojení. Z tohoto důvodu používáme ochrany a signalizační zařízení, které nám pomáhají minimalizovat škody způsobené těmito poruchami, případně jim předejít úplně. V případě, že nastane nějaká porucha, je jejich úkolem nám pomoci rychle poruchu co nejrychleji identifikovat a lokalizovat, aby bylo možno přejít k jejímu okamžitému napravení.

2. Popis kabelových i venkovních sítí nn a vn

Elektrická vedení se řeší dvěma způsoby, a to buď jako venkovní nebo jako kabelová vedení. U obou druhů vedení je třeba nejprve navrhovat po elektrické stránce (provozní napětí, proudové zatížení, úbytky napětí, přenosové ztráty atp.) a poté po konstrukční a mechanické stránce. U kabelových vedení je mechanická a konstrukční stránka obecně jednodušší než u venkovních vedení, u venkovních vedení je třeba vzít v potaz atmosférické vlivy (vítr, námraza atp.) a jejich změnu podél trasy vedení. Při návrhu je tedy třeba najít optimální řešení jak z hlediska elektrického, tak i z hlediska mechanického [1].

2.1. Venkovní vedení

Vodiče venkovních vedení jsou tvořeny vodiči zavěšenými nad terénem. Vodiče zpravidla postrádají izolaci a jejich bezpečnost je převážně zajištěna jejich polohou, tedy tím že jsou zavěšeny v dostatečné výšce nad povrchem. Náklady na jejich pořízení jsou nižší než u kabelových vedení, což je důvodem, proč jsou preferována oproti vedením kabelovým [2].

Parametry vodičů venkovních vedení

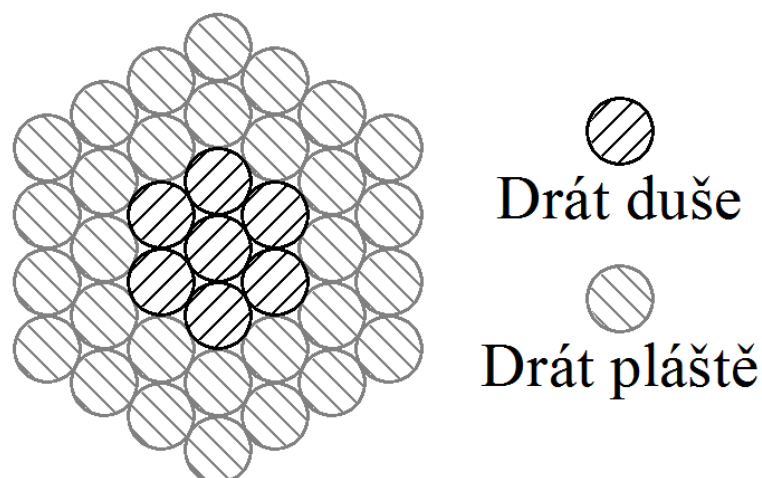
Od vodičů venkovního vedení jsou požadovány tyto vlastnosti:

- Malá hmotnost z hlediska doprav a zatížení nosných částí vedení, ale velká hmotnost z hlediska vlivu větru
- Malý průměr z hlediska námrazy a vlivu větru, ale velký průměr z hlediska rušení korunou
- Velká pevnost
- Odolnost proti chemickým vlivům (z okolí, např. hutě, chemické továrny)
- Malý elektrický odpor
- Malé pořizovací náklady, atp.

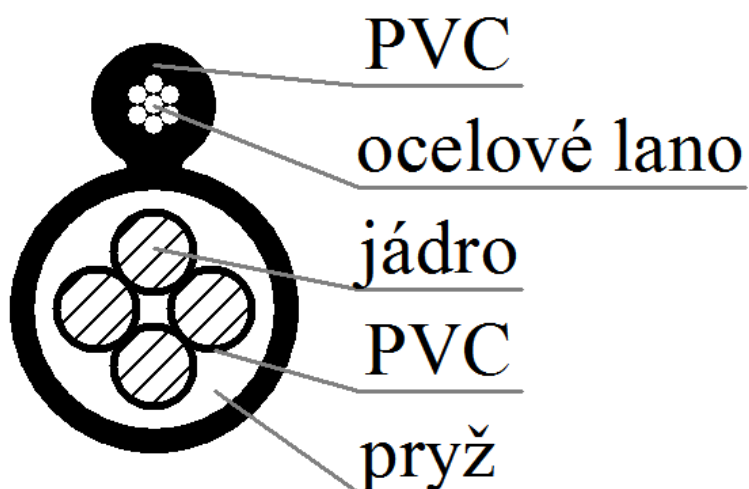
Na venkovní vedení se používají lana, dráty a závěsné kabely. Jako materiál jsou nejpoužívanější měď a hliník, který se ještě kombinuje s železem pro zvýšení jeho jinak velmi malé pevnosti (lana AlFe).

Konstrukčně lze řešit vodiče různými způsoby:

- a) Dráty lze využít pouze pro vedení do 1 kV.
- b) Prostá lana lze využít pro silová vedení všech napětí. Vyrábějí se zkrucováním jednotlivých vrstev drátů, přičemž každá následující vrstva se navíjí opačným směrem, aby se lano nerozplétalo. Ve srovnání s drátem má lano větší hmotnost, větší elektrický odpor, menší pevnost, menší modul pružnosti a menší indukčnost. Oproti drátu je lano ohebnější a při provozu bezpečnější.
- c) Kombinovaná lana jsou konstruována ze dvou materiálů. Jeden materiál s velkou pevností tvoří nosnou část lana, tzv. duši. Obvykle se používá ocel Fe. Druhý materiál s velkou vodivostí tvoří elektrovednou část lana, tzv. plášť. Užívají se kombinace hliníku s ocelovou duší, tzv. AlFe X materiály kde X udává zaokrouhlený poměr průřezu hliníku a oceli v laně.
- d) Závěsné kabely se využívají v sítích nn, kde nahrazují klasické přípojky. Konstrukčně je tvořen klasickým kabelem s hliníkovými vodiči, ke kterému je ve společné izolaci přičleněno ocelové nosné pozinkované lano [1].



Obr. 2.1: Průřez kombinovaným lanem AlFe [1]



Obr. 2.2: Průřez závěsným kabelem [1]

Elektrické parametry venkovních vedení

Do základních parametrů patří odpor, indukčnost (popř. indukční reaktance), vodivost a kapacita (popř. kapacitní susceptance). Tyto parametry jsou obvykle vyjádřeny na délku vedení.

Odpor R a indukční reaktance $X = \omega L$ tvoří podélnou impedanci $Z = R + j\omega L = R + jX$. Svodová vodivost G a kapacitní susceptance $B = \omega C$ tvoří příčnou admitanci $Y = G + j\omega C = G + jB$. Pokud jsou veličiny R , X , G , B vyjádřeny na jednotku délky, pak i Z a Y jsou vyjádřeny na jednotku délky [2].

Odpor

Při ustáleném stejnosměrném proudu platí následující vztah (používá se i pro střídavé obvody):

$$R_{ss} = \rho_0 \frac{l}{S} [\Omega] [2] \quad (2.1)$$

- ρ_0 měrný odpor, obvykle udávaný pro teplotu 20 °C [$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$]
 l délka vodiče [m]
 S průřez vodiče [mm^2]

Výsledný odpor dále ovlivňují následující faktory:

- a) Materiál a jeho čistota – vyjadřujeme měrným odporem ρ_0 , předepsaným normou pro teplotu ϑ_0 .
 b) Teplota vodiče – vyjadřujeme činitelem k_ϑ .

$$k_\vartheta = 1 + \alpha(\vartheta - \vartheta_0) + \beta(\vartheta - \vartheta_0)^2 \quad [-] [2] \quad (2.2)$$

- α teplotní součinitel [K^{-1}]
 β teplotní součinitel [K^{-2}]
 ϑ uvažovaná teplota [$^\circ\text{C}$]

Činitel $\beta(\vartheta - \vartheta_0)^2$ se u Cu, Al a AlFe vodičů zanedbává při oteplení do 100 °C.

Tab. 2.1: Teplotní činitele odporu a měrný odpor [2]

Materiál	Cu	Al, AlFe
α [K^{-1}]	$3,93 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
β [K^{-2}]	$0,45 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$
ρ_{20} [$\mu\Omega \cdot \text{m}$]	$17,8 \cdot 10^{-3}$	$28,7 \cdot 10^{-3}$

- c) Povrchový jev (skinefekt) – nerovnoměrné rozložení střídavého proudu po průřezu vodiče, který způsobuje zvětšení odporu v porovnání s odporem pro stejnosměrný proud. Vyjadřujeme činitelem zvětšení odporu k_s .

Pro vodič kruhového průřezu z jednoho materiálu lze stanovit výpočtem podle Besselových funkcí. Zavedeme-li:

$$m = \frac{r}{2} \sqrt{\frac{\mu\omega}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{\mu f}{2R_{ss}}} \quad [-] [2] \quad (2.3)$$

- μ permeabilita [$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$]
 ω úhlová rychlost [s^{-1}]
 ρ_0 měrný odpor [$\Omega \cdot \text{m}$]
 f frekvence [Hz]
 r poloměr [m]
 R_{ss} stejnosměrný odpor na jednotku délky [$\Omega \cdot \text{m}^{-1}$]

Pak lze pro k_s u Cu a Al vodičů použít zjednodušené vztahy:

$$\begin{aligned}
 \text{pro } m \leq 1,2 \text{ platí } k_s &= 1 + \frac{m^4}{12} - \frac{m^8}{180} + \frac{m^{12}}{2442} \quad [-] [2] \\
 \text{pro } m > 1,2 \text{ platí } k_s &= 0,25 + 0,708 \cdot m + 0,06625 \cdot m^{-1} \quad [-] [2]
 \end{aligned} \quad (2.4)$$

Pro vodiče z feromagnetických materiálů musíme použít jiný vztah, protože jejich permeabilita je funkcí proudu. Používáme tedy tyto vzorce:

$$\begin{aligned} \text{pro } m \leq 2 \text{ platí } k_S &= 1 + 0,85 \cdot m^2 - 0,3 \cdot m^3 + 0,05 \cdot m^4 \text{ [-]}[2] \\ \text{pro } m > 2 \text{ platí } k_S &= 1,4 \cdot m \text{ [-]}[2] \end{aligned} \quad (2.5)$$

Lana AlFe jsou zvláštní případ, kde činitel k_S závisí na počtu vrstev vodičů Al na lanu Fe. Při jedné vrstvě je činitel velmi vysoký a závisí na permeabilitě a velikosti proudu. Při dvou vrstvách Al lze použít vzorec pro lana z jednoho materiálu. Při vyšším počtu vrstev můžeme také použít vzorec pro dutá lana, protože ocelovou duší prochází pouze asi 2 až 3 % celkového proudu. Platí:

$$k_S = 1 + 0,0375 \cdot 10^{-12} \left[\frac{(r_2 - r_1)f}{r_2 R_{ss}} \right]^2 \text{ [-]}[2] \quad (2.6)$$

r_1	vnitřní poloměr Al vrstvy, dosazuje se ve stejné jednotce jak r_2
r_2	vnější poloměr Al vrstvy, dosazuje se ve stejné jednotce jak r_1
f	frekvence [Hz]
R_{ss}	stejnoseměrný odpor na jednotku délky [$\Omega \cdot m^{-1}$]

- d) Kroucení lan – způsobí zvětšení odporu proti plnému vodiči stejné osově délky. Vyjadřujeme činitelem k_1 . Nečistoty a oxidy na vodiči způsobují velký přechodový odpor mezi povrchy jednotlivých vodičů lana a způsobí, že se proud rozdělí na jednotlivé vodiče, které mají průměr d , a prochází šroubovicí. Činitel zvětšení odporu zlaněním je dán poměrem délky závitu šroubovice k její výšce a_n , měřené v ose vodiče. Platí:

$$k_1 = \frac{\sqrt{a_n^2 + (D_n - d)^2 \pi^2}}{a_n} \text{ [-]}[2] \quad (2.7)$$

a_n	výška šroubovice [m]
D_n	vnější průměr lana [m]
d	průměr vodiče [m]

- e) Průhyb lana – vyjadřujeme činitelem k_p . Nejprve je nutno určit parametr c a délku l_h řetězovky podle vztahů:

$$c = \frac{pA}{G} \text{ [m]}[2] \quad (2.8)$$

$$l_h = 2c \cdot \sinh \frac{a}{2c} \text{ [m]}[2] \quad (2.9)$$

p	horizontální tah [Pa]
A	průřez [m^2]
G	tíha na jednotku délky [$N \cdot m^{-1}$]
a	rozpětí lana [m]

Samotný činitel zvětšení odporu průhybem se vypočte podle následujícího vzorce:

$$k_p = \frac{l_h}{a} [2] \quad (2.10)$$

Výsledný odpor lze tedy vyjádřit tímhle vztahem:

$$R_1 = R_{ss} k_\theta k_S k_1 k_p \text{ [}\Omega\text{]}[2] \quad (2.11)$$

V mnoha případech je také třeba počítat s odporem země, protože země může být použita jako vodič elektrické energie. Její činný odpor se vypočítá podle vztahu:

$$R_Z = \pi^2 \cdot f \cdot 10^{-4} [\Omega \cdot \text{km}^{-1}] [2] \quad (2.12)$$

Indukčnost

Proud protékající vodičem kolem něj vytváří magnetické pole, které působí jak na samotný vodič, tak i na vodiče okolo něj. Rozlišujeme tedy vlastní indukčnost vodiče a vzájemnou indukčnost jednotlivých vodičů.

Vlastní indukčnost lze vyjádřit následujícím vztahem na jednotku délky vodiče:

$$L = 0,46 \cdot \log \frac{2l}{r} - 0,15 [\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (2.13)$$

l délka vodiče, dosazuje se ve stejné jednotce jako r

r poloměr vodiče, dosazuje se ve stejné jednotce jako l

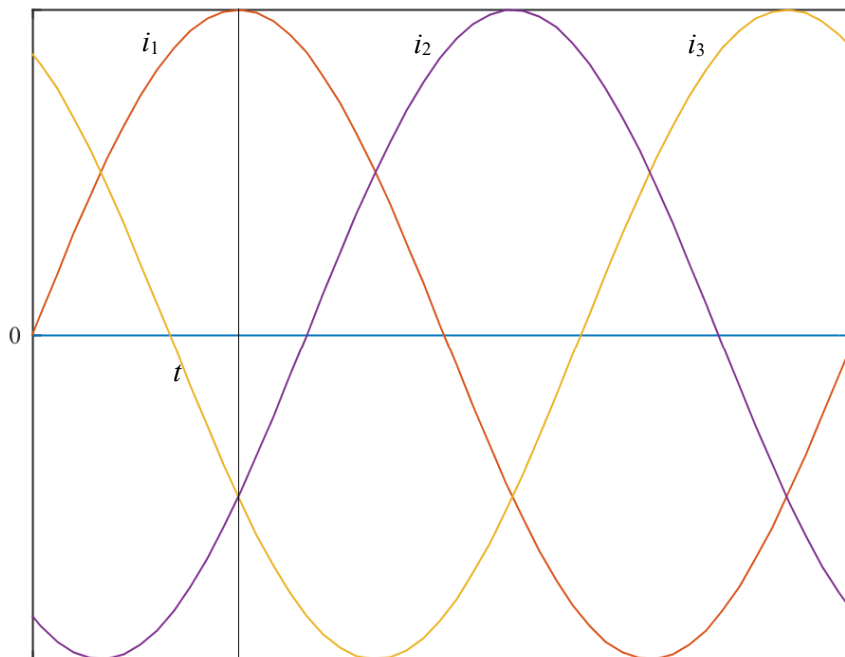
Vzájemnou indukčnost, také na jednotku délky vodiče, vyjádříme následovně:

$$M = 0,46 \cdot \log \frac{2l}{a} - 0,2 [\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (2.14)$$

a vzdálenost mezi vodiči, dosazuje se ve stejné jednotce jako l

Jednoduché trojfázové vedení nesymetrické

Předpokládáme, že součet proudů v kterémkoliv časovém okamžiku je roven nule. Vzhledem k nesymetrii vedení ale nejsou stejné vzájemné indukčnosti mezi jednotlivými vodiči.



Obr. 2.3: Průběh trojfázového proudu

V okamžiku t , kdy je proud jedné fáze maximální lze určit poměr proudů pomocí tohoto vztahu:

$$-i_1 = i_2 + i_3 \rightarrow i_2 = i_3 = -\frac{i_1}{2} \quad (2.15)$$

Elektromotorické napětí prvního vodiče lze vyjádřit jako:

$$e = -L \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{2} M_{12} \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{2} M_{13} \frac{di_1}{dt} = -\left(L - \frac{1}{2} M_{12} - \frac{1}{2} M_{13}\right) \frac{di_1}{dt} = -L_{C1} \frac{di_1}{dt} \quad (2.16)$$

Výsledná indukčnost prvního vodiče se vyjádří jako:

$$L_{C1} = L - \frac{1}{2} M_{12} - \frac{1}{2} M_{13} = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt{a_{12} \cdot a_{13}}}{r} + 0,05 \text{ [mH. km}^{-1}] \quad (2.17)$$

a_{xy} vzdálenost mezi příslušnými fázemi

Analogicky platí totéž pro druhý a třetí vodič:

$$\begin{aligned} L_{C2} &= 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt{a_{12} \cdot a_{23}}}{r} + 0,05 \text{ [mH. km}^{-1}] \\ L_{C3} &= 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt{a_{13} \cdot a_{23}}}{r} + 0,05 \text{ [mH. km}^{-1}] \end{aligned} \quad (2.18)$$

Z těchto tří vypočtených indukčností se poté vypočítá střední indukčnost vedení:

$$L_{Cstř} = \frac{1}{3} (L_{C1} + L_{C2} + L_{C3}) = 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{13} \cdot a_{23}}}{r} + 0,05 \text{ [mH. km}^{-1}] \quad (2.19)$$

Neboli také:

$$L_{Cstř} = 0,46 \cdot \log \frac{a_S}{r} + 0,05 \text{ [mH. km}^{-1}] \quad (2.20)$$

$L_{Cstř}$ střední indukčnost vedení na kilometr [mH.km⁻¹]

r poloměr vodiče [m]

a_S střední vzdálenost vodičů [m]

$$a_S = \sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{13} \cdot a_{23}} \text{ [m]} \quad (2.21)$$

Kapacita

Elektrické pole se vytváří kolem vodiče a působí na vodič samotný i na okolní vodiče. Proto jednotlivé vodiče vykazují kapacitu. Odvození kapacity vedení vychází ze vztahu pro elektrický potenciál:

$$U = \frac{Q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{\rho_0}{\rho} \text{ [V]} \quad (2.22)$$

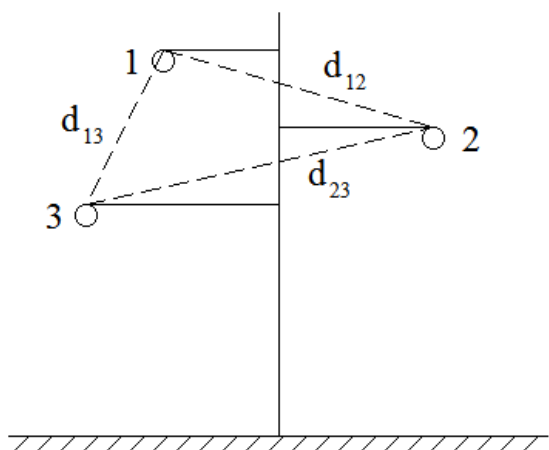
U potenciál [V]

Q náboj vodiče [C.m⁻¹]

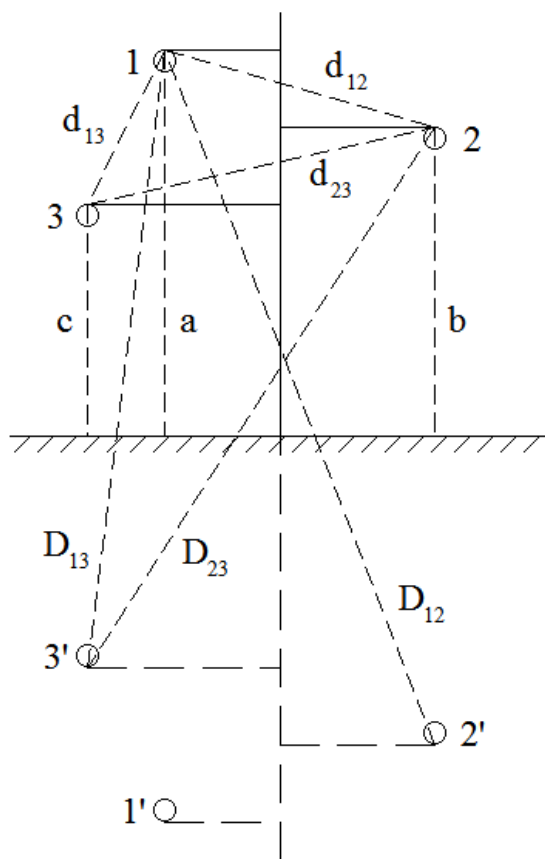
ϵ permitivita [F.m⁻¹]

ρ vzdálenost od vodiče [m]

ρ_0 vzdálenost od vodiče, ve které se předpokládá nulový potenciál [m]



Obr. 2.4: Nesymetrické vedení
bez uvažování vlivu země



Obr. 2.5: Nesymetrické vedení
s uvažováním vlivu země

Trojfázové vedení

Uvažujme, že vedení je nesymetrické, d_{xy} jsou vzdálenosti mezi jednotlivými vodiči a obdobně jako u odvození indukčnosti se proud první fáze nachází ve svém maximu. Pak pro elektrický náboj platí:

$$Q = Q_1 \rightarrow Q_2 = Q_3 = -\frac{Q}{2} \quad (2.23)$$

Elektrický potenciál na povrchu prvního vodiče určíme vztahem:

$$U_1 = \frac{Q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{\rho_0}{r} - \frac{Q}{4\pi\epsilon} \ln \frac{\rho_0}{d_{12}} - \frac{Q}{4\pi\epsilon} \ln \frac{\rho_0}{d_{13}} = \frac{Q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{\sqrt{d_{12} \cdot d_{13}}}{r} \quad (2.24)$$

Kapacitu prvního vodiče pak určíme vztahem:

$$C_1 = \frac{1}{18 \ln \frac{\sqrt{d_{12} \cdot d_{13}}}{r}} [\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (2.25)$$

Analogicky pro zbývající dva vodiče:

$$C_2 = \frac{1}{18 \ln \frac{\sqrt{d_{12} \cdot d_{23}}}{r}} [\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}]$$

$$C_3 = \frac{1}{18 \ln \frac{\sqrt{d_{13} \cdot d_{23}}}{r}} [\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (2.26)$$

Tak jako u indukčnosti jsme spočítali střední indukčnost pro celé vedení, zde vypočítáme střední kapacitu:

$$C_{\text{stř}} = \frac{1}{3} (C_1 + C_2 + C_3) = \frac{1}{18 \ln \frac{\sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}}}{r}} = \frac{1}{18 \ln \frac{d_s}{r}} [\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (2.27)$$

$C_{\text{stř}}$ střední kapacita vedení na kilometr [$\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$]
 r poloměr vodiče [m]
 d_s střední vzdálenost vodičů [m]

$$d_s = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}} [\text{m}] \quad (2.28)$$

Trojfázové vedení s uvažováním vlivu země

V tomhle případě se musí uvažovat i s výškou vodičů nad zemí (a, b, c) a se vzdáleností vodičů od zrcadlových obrazů (D_{xy})

$$C_{\text{stř}} = \frac{1}{3} (C_1 + C_2 + C_3) = \frac{1}{18 \ln \frac{d_s \cdot 2m}{r \cdot D_s}} = \frac{0,0242}{\log \frac{d_s \cdot 2m}{r \cdot D_s}} [\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (2.29)$$

$$D_s = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{13} \cdot D_{23}} [\text{m}] \quad (2.30)$$

$$m = \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c} [\text{m}] \quad (2.31)$$

2.2. Kabelové vedení

Pro vedení nn se převážně využívají trojfázové kabely opatřené izolací z PVC nebo polyetylénu. Takto vzniklé žíly se pak slaní, opatří společnou izolační obálkou a podle druhu kabelu případně ještě kovovým obalem a pancířem.

Pro vedení vn se používají trojfázové kabely, u nichž je každá žíla opatřena buď olověným pláštěm nebo kovovou fólií. Kabel má společný olověný plášť a další krycí obaly.

U kabelů je třeba zajistit normou předepsanou hloubku uložení [1]. Jednožilové kabely se ukládají v trojúhelníkovém uspořádání nebo vedle sebe v jedné rovině. Náklady na pořízení kabelových vedení jsou znatelně dražší, než u venkovních vedení. Proto se většinou používají pouze tehdy, pokud z různých důvodů (prostorových, povětrnostních) nelze použít venkovní vedení.

Elektrické parametry kabelových vedení

Podélná impedance

Tak jako u venkovních vedení je tvořena odporem R a indukční reaktancí $X = \omega L$. U odporu kabelových vedení se ale nepočítá s průhybem, nýbrž je třeba zahrnout do odporu vířivé a hysterezní ztráty

způsobené užitím kovového pláště a kovového pancíře a ztráty způsobené vlivem jevu blízkosti. Tyto jevy jsou souhrnně označeny jako ΔR . Celkový odpor je tedy:

$$R = R_{\sim} + \Delta R \text{ } [\Omega] [2] \quad (2.32)$$

R_{\sim} odpor bez respektování vlivu pláště, pancíře a jevu blízkosti $[\Omega]$

Výsledný odpor se tedy zjistí podle následujícího vzorce

$$R = R_{ss01} k_{\theta} k_s k_1 + \Delta R \text{ } [\Omega] [2] \quad (2.33)$$

Přídavný odpor ΔR se respektuje jen při podrobných výpočtech a známe teplotě vodičů kabelu.

Indukčnost se dá vypočítat stejnými vzorci jako u venkovních vedení pouze pro trojfázové plastové kabely. Obecně je však indukčnost u kabelů menší než u venkovních vedení stejné napěťové hladiny a stejných přenosových schopností. Pro ostatní druhy kabelů (se stíněním, pancířem atd.) platí složitější vztahy, proto je u kabelů hodnota induktivní reaktance na kilometr délky udávána výrobcem. U kabelových vedení s malými průřezy, např. u domovních rozvodů, je možné reaktanci zanedbat [2].

Příčná admitance

Jako u venkovních vedení je tvořena dvěma složkami, a to svodovou vodivostí G a kapacitní susceptancí $B = \omega C$. Svodová vodivost souvisí s dielektrickými ztrátami v izolaci kabelu. Svodová vodivost se respektuje až od jmenovitého napětí o hladině 220 kV a výše. Vzhledem k používání různých konstrukčních uspořádání a použitých izolačních materiálů dostáváme značně rozdílné hodnoty v jednotlivých případech.

Kapacita kabelových vedení

Obecně platí, že kapacita kabelů je větší než kapacita venkovních vedení stejné napěťové hladiny a stejných přenosových schopností. Také relativní permitivita izolace kabelu má vyšší hodnotu než jedna.

Rozlišujeme dvě skupiny kabelů:

- Jednožilové a vícežilové s vlastním kovovým pláštěm nebo stíněním na každé žíle
- Vícežilové se společným kovovým pláštěm pro všechny žíly

Kabely v případě a) mají kapacitu pouze jedinou, která je kapacitou vodiče proti plášti a zároveň kapacitou provozní. Se zanedbáním vlivů konců kabele je elektrické pole tohoto kabelu radiální. Jejich kapacita se vypočte jako kapacitu souosých válců na jednotku délky:

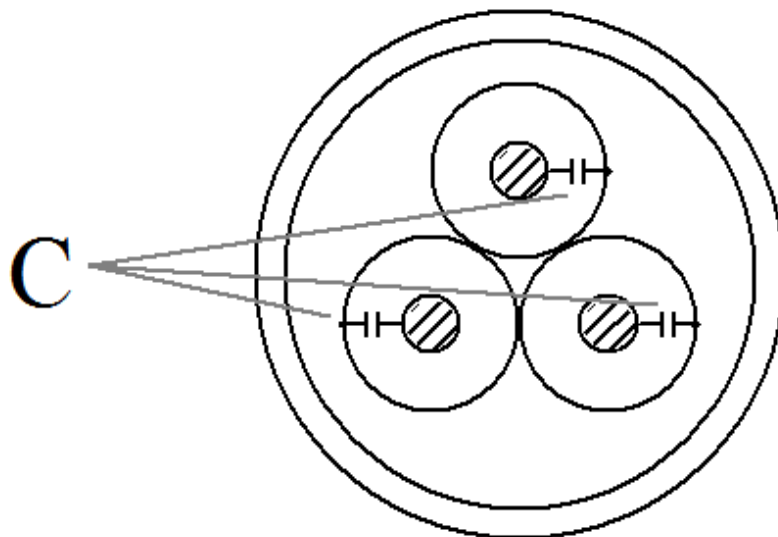
$$C = c_{ko} = \frac{0,0242 \varepsilon_r}{\log \frac{r_2}{r_1}} \text{ } [\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}] [2] \quad (2.34)$$

ε_r poměrná permitivita izolace mezi vodičem a kovovým obalem [–]

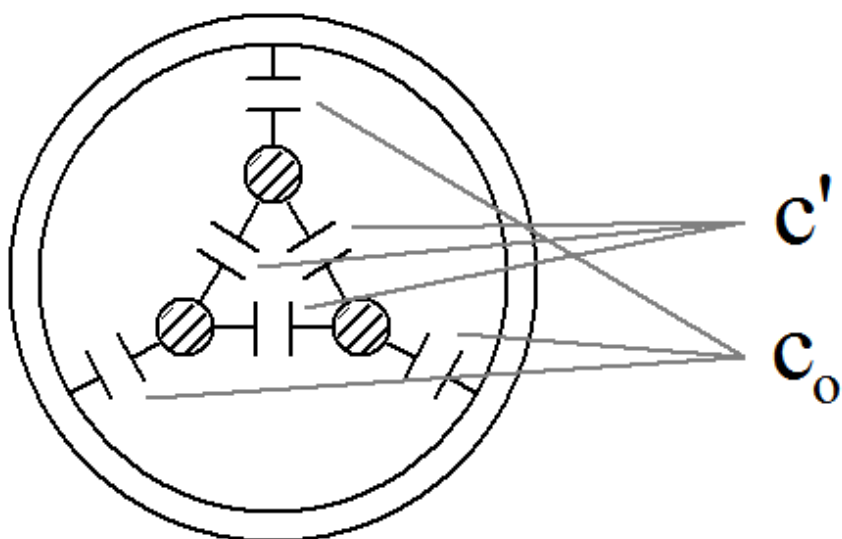
r_1 poloměr vodiče [cm]

r_2 vnitřní poloměr kovové obálky [cm]

Kabely v případě b) mají dohromady tři různé kapacity – provozní kapacitu C , kapacitu k plášti c_o , a vzájemné kapacity c' . Výpočet těchto kapacit je složitější než u venkovních vedení a závisí na typu kabelu (pokovené žíly, pancíř atd.).



Obr. 2.6: Kapacita stíněných a trojplášťových kabelů [2]



Obr. 2.7: Kapacity kabelů se společným pláštěm [2]

I když se kapacita prvního druhu kabelů dá vypočítat vcelku jednoduše, je lepší řídit se buď hodnotou kterou udává výrobce, případně ji určit měřením. Pro určení kapacity měřením musíme změřit tzv. nabíjecí proud I_{NAB} , což je proud, který do kabelu teče při stavu naprázdno. Kapacitu z něj vypočteme pomocí vztahu:

$$C = \frac{I_{\text{NAB}}}{2\pi f \cdot l \cdot U_f \cdot 10^{-6}} \text{ [}\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}\text{]} \quad (2.35)$$

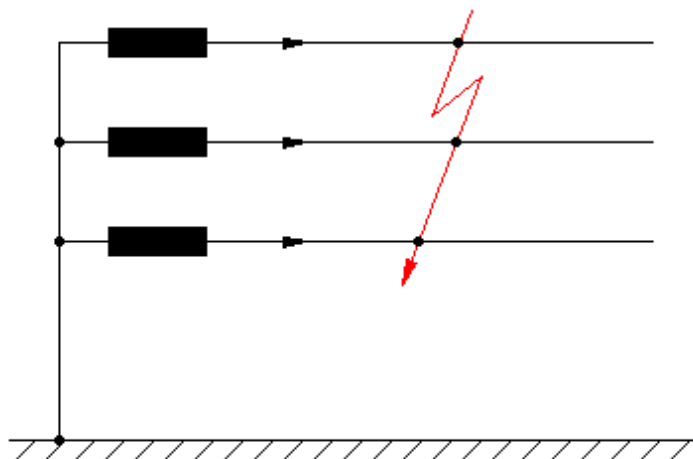
I_{NAB}	nabíjecí proud [A]
f	frekvence sítě [Hz]
l	délka vedení [km]
U_f	fázové napětí vedení [V]

3. Teoretický rozbor vzniku jednopólových poruch

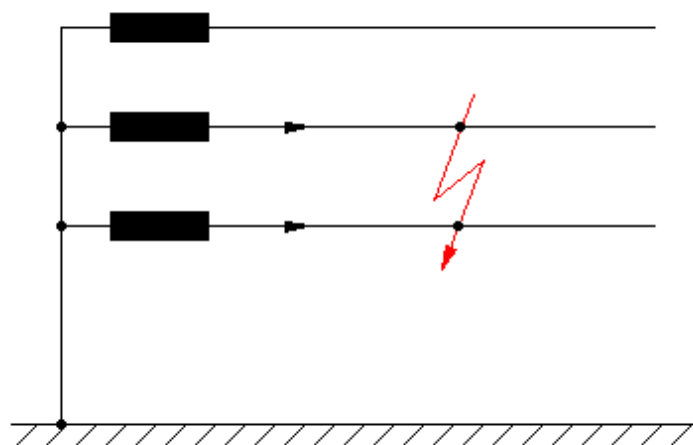
Přechodné děje v elektrizačních soustavách vznikají vždy při přechodu z jednoho ustáleného provozního stavu do nového ustáleného provozního stavu. Příčin narušení ustáleného chodu může být mnoho:

- Lidský zásah, např. poškození izolace při montáži
- Přírodní vlivy, např. atmosférické jevy
- Poruchy zařízení, např. vypnutí alternátoru ze synchronismu
- Změna zatížení elektrizační soustavy
- Další příčiny

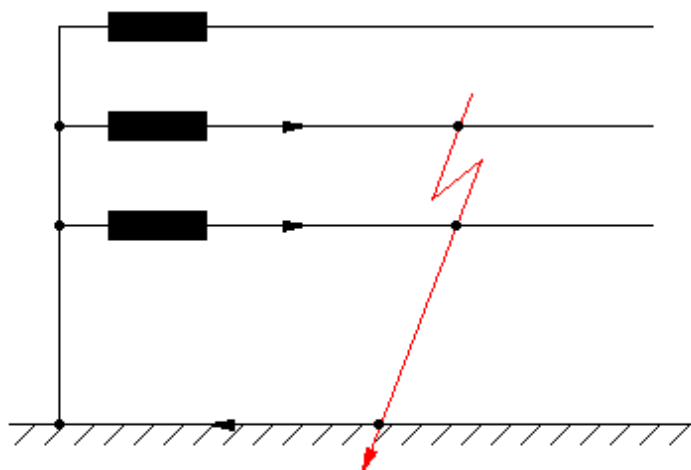
Zkrat je nejčastější příčina vzniku přechodných jevů. Pojmem zkrat rozumíme poruchu, při které dojde ke spojení nakrátko dvou nebo tří fází a v obvodech s uzemněným nulovým vodičem také ke spojení nakrátko jedné nebo dvou fází se zemí (resp. se středním vodičem).



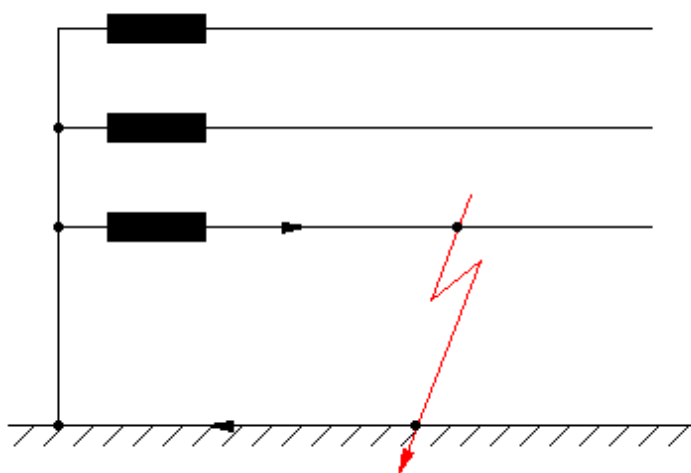
Obr. 3.1: Trojfázový zkrat [5]



Obr. 3.2: Dvoufázový zkrat [5]



Obr. 3.3: Dvoufázový zemní zkrat [5]



Obr. 3.4: Jednofázový zkrat [5]

Dále ještě máme zemní spojení. Zemní spojení je podobné jednofázovému zkratu, ale zatímco k jednofázovému zkratu dojde při vodivém spojení jedné fáze se zemí v sítích s přímo uzemněným uzlem, u zemního spojení dojde k vodivému spojení jedné fáze se zemí v sítích s izolovaným uzlem, popř. v sítích s vykompenzovaným uzlem. Sítě s vykompenzovaným uzlem jsou sítě, jež mají uzel spojen se zemí přes zhášecí tlumivky nebo je u nich vytvořena umělá nula přes zhášecí transformátory. Místem zemního spojení prochází pouze malý proud kapacitního charakteru [3].

Důsledky zkratů a zemních spojení

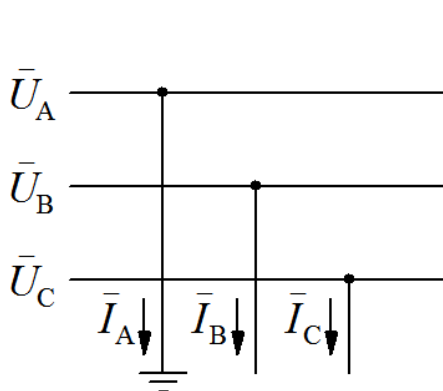
Při vzniku zkratových proudů se několikanásobně zmenšuje impedance obvodu mezi místem zkratu a napěťovými zdroji, proudy ve větvích vzrostou a napětí v uzlech poklesnou.

Zkratové proudy sice působí krátkodobě, dosahují však značných velikostí, kvůli čemuž jsou jejich tepelné účinky velmi nebezpečné pro elektrická zařízení. Kromě nebezpečných tepelných účinků se také projevují velkými mechanickými silami, které vznikají mezi vodiči při zkratu a které jsou zvláště nebezpečné pro elektrické stroje a přístroje.

Hluboké poklesy napětí zase mohou působit rušivě na mnoho elektrických spotřebičů. Kromě toho mohou být i příčinou narušení stability paralelního chodu alternátorů, což je jeden z nejnebezpečnějších následků zkratu, protože by tím byla postihnuta celá elektrizační soustava.

Při zemním spojení dochází hlavně k poškození izolace fází a nulových uzlů článků elektrizační soustavy. Fázová napětí při něm totiž vzrůstají na velikost sdružených napětí a napětí nulového uzlu transformátorů se zvýší na velikost fázového napětí. Pokud je zemní spojení přerušováno, tak se napěťové namáhání izolace několikanásobně zvětšuje [3].

Jednofázový zkrat

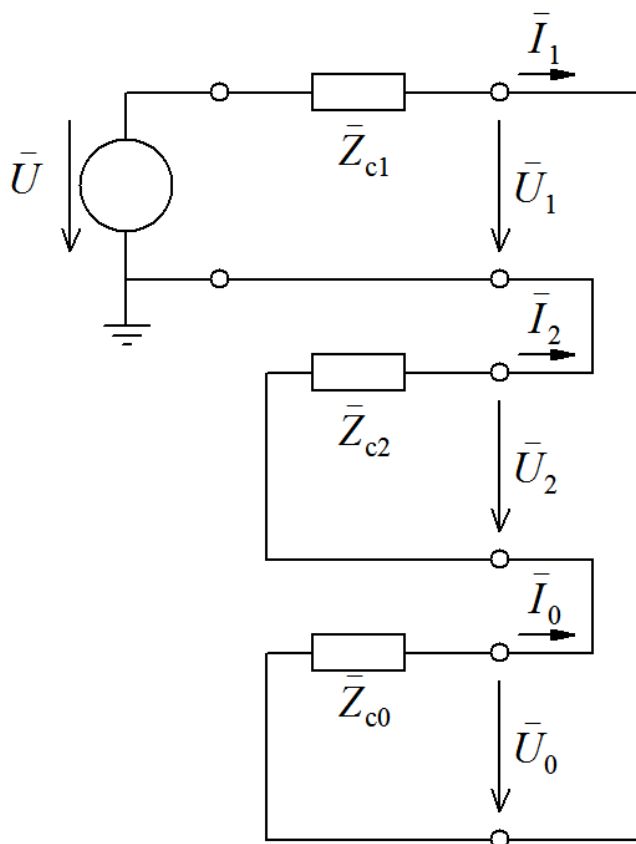


Obr 3.5: Schématické znázornění
jednofázového zkratu [3]

\bar{U}	napětí zdroje
\bar{Z}_{c1}	celková impedance sousledné složky soustavy
\bar{Z}_{c2}	celková impedance zpětné složky soustavy
\bar{Z}_{c0}	celková impedance netočivé složky soustavy
$\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_0$	proudy jednotlivých složek
$\bar{U}_1, \bar{U}_2, \bar{U}_0$	napětí jednotlivých složek

Z obrázku 3.5 vyplývá, že:

$$\bar{U}_A = 0, \bar{I}_B = 0 \text{ a } \bar{I}_C = 0$$



Obr. 3.6: Propojená náhradní schémata
složkových soustav [3]

Pro proudy v obrázku 3.6 platí tento důležitý vztah:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \bar{I}_0 = \frac{1}{3} \bar{I}_A \quad [3] \quad (3.1)$$

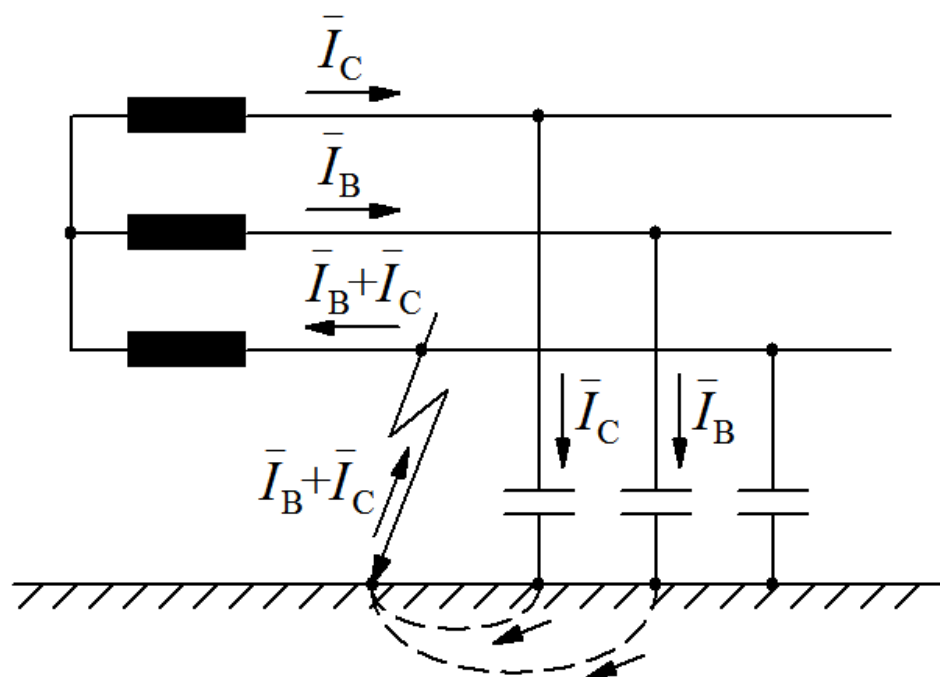
Z náhradního schématu na obrázku 3.6 vychází, že složkové proudy se rovnají:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \bar{I}_0 = \frac{\bar{U}}{\bar{Z}_{c1} + \bar{Z}_{c2} + \bar{Z}_{c0}} \quad [3] \quad (3.2)$$

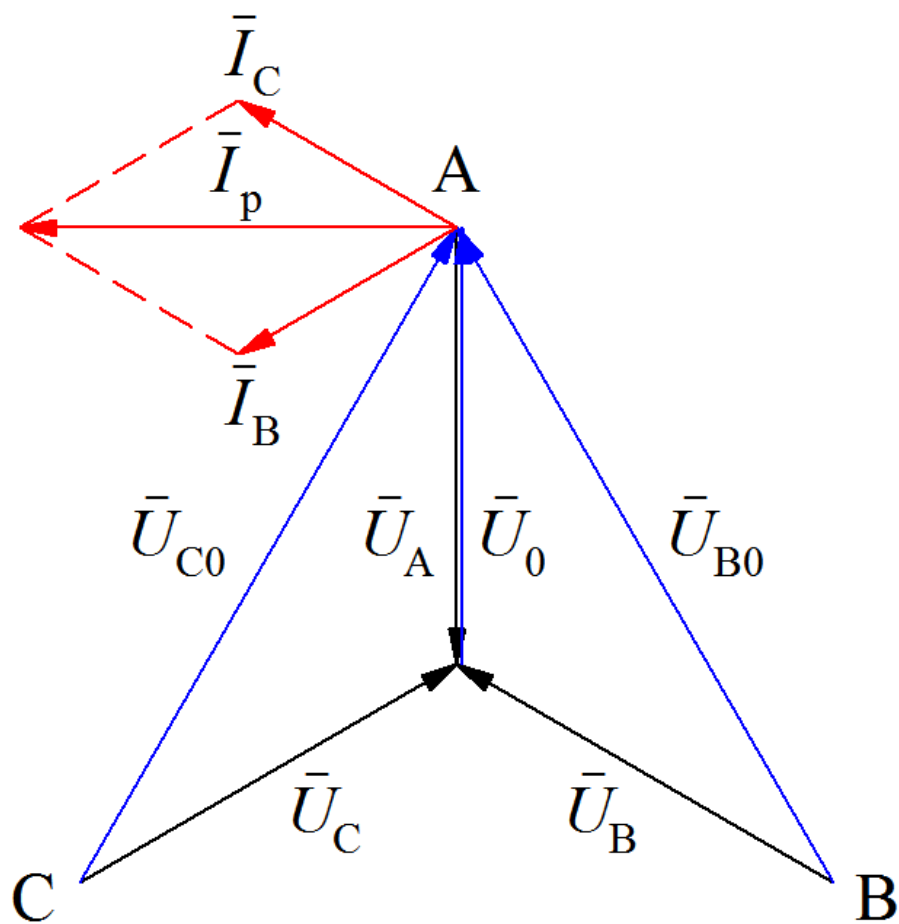
Z toho také vyplývají následující rovnosti:

$$\bar{I}_A = 3\bar{I}_1, \bar{I}_B = 0 \text{ a } \bar{I}_C = 0$$

Zemní spojení



Obr. 3.7: Schématické znázornění sítě s izolovanou nulou při zemním spojení [6]



Obr. 3.8: Fázorový diagram soustavy bez kompenzace (zemní spojení v bodě A) [6]

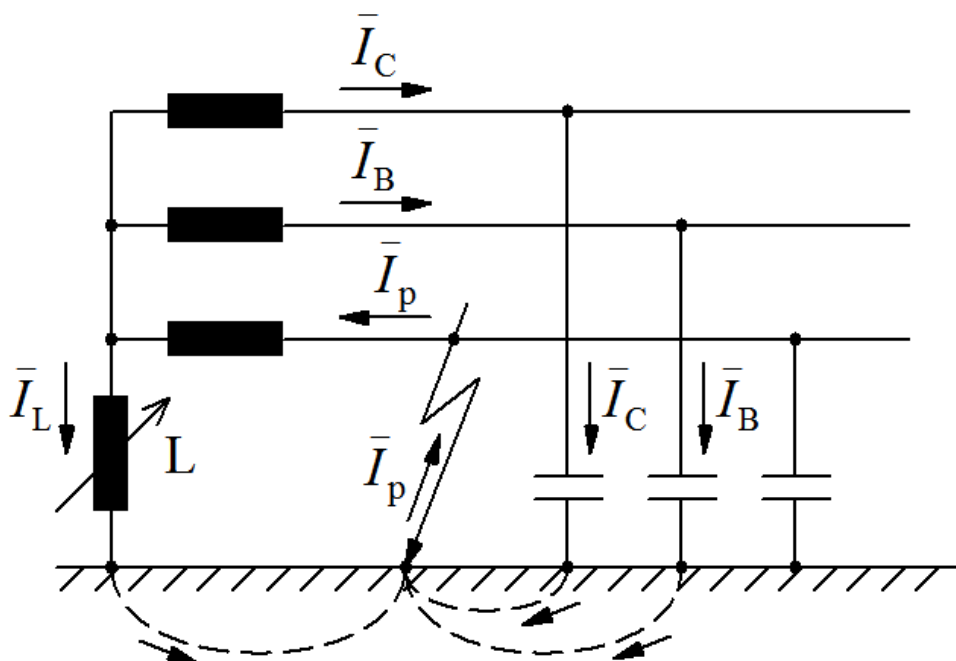
\bar{U}_0	napětí na tlumivce
$\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$	fázová napětí
$\bar{U}_{B0}, \bar{U}_{C0}$	napětí jednotlivých fází vůči zemi
\bar{I}_p	poruchový proud
\bar{I}_B, \bar{I}_C	proudy fází B a C

4. Možnosti kompenzace zemních kapacitních proudů

Nejčastěji užívaný princip kompenzace zemních kapacitních proudů je pomocí plynule regulovatelné zhášecí tlumivky, které propojuje zemi a nulový uzel transformátoru nebo také pomocí umělé nuly vytvořené zapojením zhášecích transformátorů. V symetricky provozované síti je součet zemních kapacitních proudů roven nule. Pokud však nastane zemní spojení na nějaké fázi, tak se kapacitní proudy zdravých fází uzavírají přes zem, zemní spojení a vinutí transformátoru. Síť je však stále možno provozovat, pokud poruchový proud nepřekročí určitou hodnotu. Krajiní hodnota je 10 A, při té už je kompenzace nutná. Doporučuje se však kompenzovat už od velikosti proudu 5 A [6].

4.1. Síť s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku

Kompenzace pomocí tlumivky využívá opačnosti fáze indukčních proudů oproti proudům kapacitním. Jinými slovy, indukční proud jdoucí od tlumivky je v protifázi s kapacitními proudy.



Obr. 4.1: Schématické znázornění vlivu tlumivky [6]

Vztah pro poruchový proud, který nám určuje, jak musíme tlumivku dimenzovat:

$$\bar{I}_p = j\sqrt{3}\omega\bar{U}C = j3\omega\bar{U}_fC \quad (4.1)$$

C součet kapacit každé fáze

Kompenzační proud tlumivky je dán jako:

$$\bar{I}_L = -j\frac{\bar{U}_f}{\omega L} \quad (4.2)$$

Abychom dosáhli úplné kompenzace kapacitních proudů, musí platit:

$$\bar{I}_L = -\bar{I}_p \quad (4.3)$$

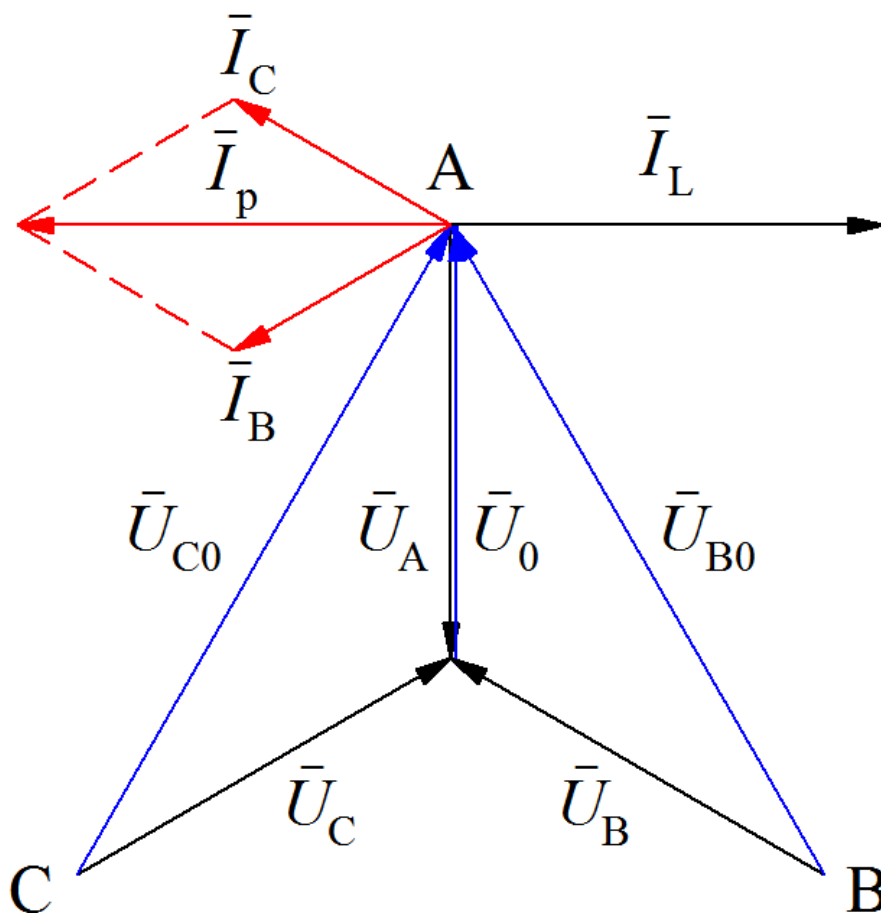
Do téhle rovnice dosadíme proudy, které jsme si předtím vyjádřili a dostaneme:

$$-j \frac{\bar{U}_f}{\omega L} = -j 3 \omega \bar{U}_f C \quad [6] \quad (4.4)$$

Úpravou rovnice dostaneme:

$$L = \frac{1}{3 \omega^2 C} \text{ [H]} [6] \quad (4.5)$$

C součet kapacit každé fáze

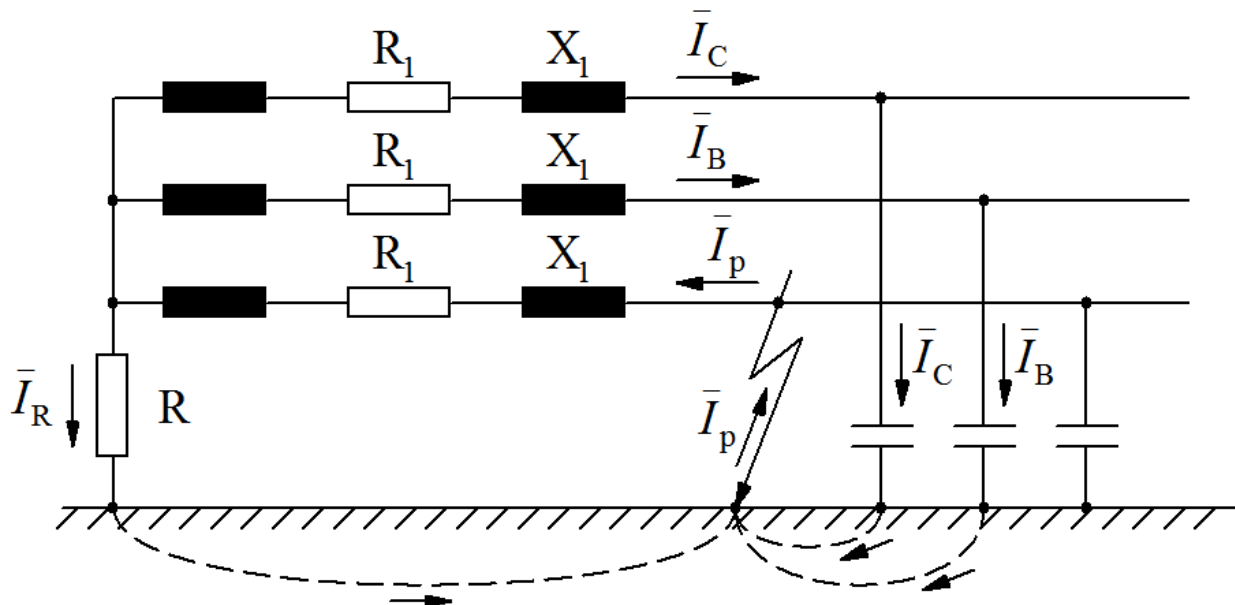


Obr. 4.2: Fázorový diagram soustavy s kompenzací tlumivkou (zemní spojení v bodě A) [6]

\bar{U}_0	napětí na tlumivce
$\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$	fázová napětí
$\bar{U}_{B0}, \bar{U}_{C0}$	napětí jednotlivých fází vůči zemi
\bar{I}_L	kompensační proud protékající tlumivkou
\bar{I}_p	poruchový proud
\bar{I}_B, \bar{I}_C	proudy fází B a C

4.2. Sít' s uzlem uzemněným přes odporník

Naladění zážací tlumivky v kapacitně souměrných sítích může být problematické, což spolu s dalšími technickými a ekonomickými problémy vede k využívání odporově uzemněných sítí.



Obr. 4.3: Schématické znázornění vlivu činného odporu [6]

Tenhle způsob uzemnění je vhodný především u kabelových sítí, kde je většina poruch trvalá, takže zmenšením poruchového proudu nemůže nastat samozhášení poruch jako při obloukových poruchách u venkovních vedení. Zhášecí tlumivka neomezuje přepětí při vzniku zemních spojení. Provoz při zemním spojení namáhá izolaci zdravých fází zvýšeným napětím a přináší riziko vzniku vícenásobných poruch.

Při zemním spojení protéká místem poruchy součet proudů činným odporem a kapacitního proudu sítě. Když vhodně zvolíme velikost odporu, bude omezena celková velikost zkratového proudu.

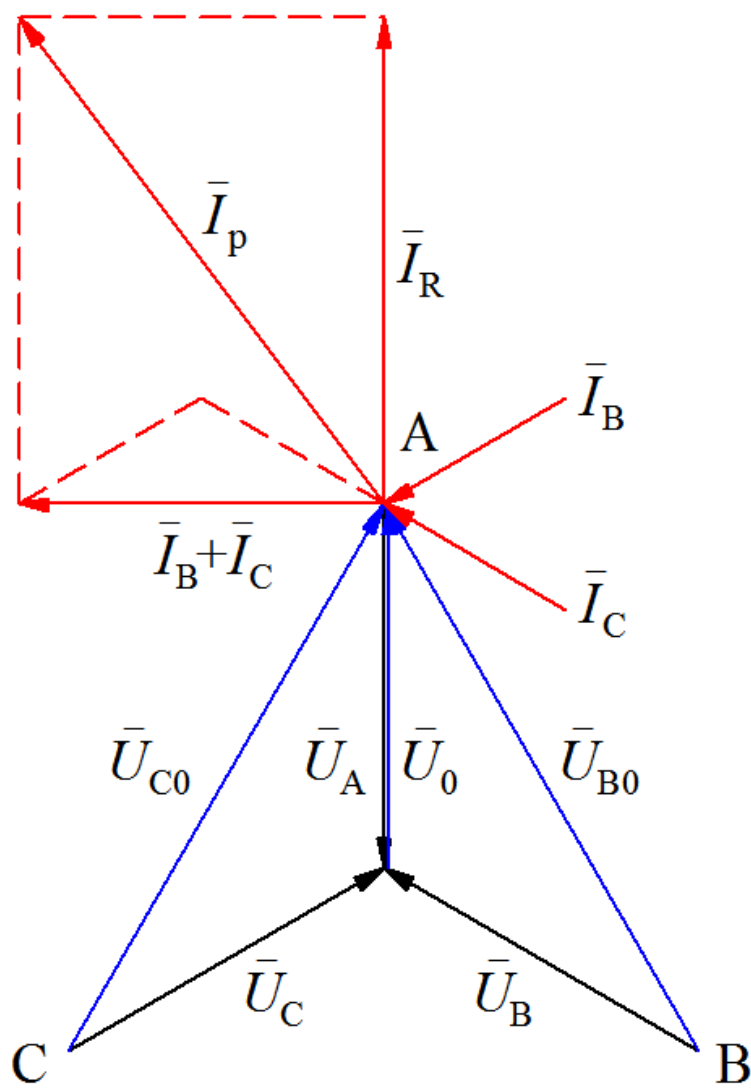
Podmínkou tlumení přepětí je vyšší velikost proudu uzlového rezistoru, než je velikost kapacitního proudu sítě:

$$I_{\text{R}} > I_{\text{kap}} [6] \quad (4.6)$$

$$\frac{U_f}{R} > 3\omega U_f C \quad [6] \quad (4.7)$$

Po úpravě dostaneme vzorec pro požadovanou hodnotu odporu:

$$R < \frac{1}{3\omega C} \quad [6] \quad (4.8)$$



Obr. 4.4: Fázorový diagram soustavy s kompenzací odporníkem (zemní spojení v bodě A) [6]

\bar{U}_0	napětí na odporníku
$\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$	fázová napětí
$\bar{U}_{B0}, \bar{U}_{C0}$	napětí jednotlivých fází vůči zemi
\bar{I}_R	kompenzační proud protékající odporníkem
\bar{I}_p	poruchový proud
\bar{I}_B, \bar{I}_C	proudy fází B a C

5. Možnosti lokalizace místa zemního spojení

Používané metody lze rozdělit na dvě základní skupiny, a to aktivní a pasivní. Princip aktivních metod spočívá ve využívání pomocného signálu se specifickou frekvencí, který je v případě poruchy připojen do soustavy a následným "stopováním" tohoto signálu dojde k lokalizaci poruchy. Aktivní metody nejsou tak rozšířeny jako pasivní, protože jsou technicky znatelně náročnější. Pasivní metody místo toho používají k lokalizaci proudových a napěťových signálů přímo generovaných vzniklou poruchou, není tedy třeba pomocného zdroje signálu. Dále se dělí na statické a aktivní. Statické využívají ustáleného signálu, tedy signálu po odeznění přechodného děje. Dynamické využívají signál při přechodném ději [4].

5.1. Statické metody

Jak už bylo řečeno výše, tyto metody primárně využívají údaje dostupné až po odeznění přechodného děje. Někdy se však vyhodnocují i údaje před vznikem poruchy, za účelem zvýšení selektivity [4].

5.1.1. Metody pro izolované soustavy

Porovnávání amplitudy netočivé složky proudu

Spočívá ve vyhodnocování amplitudy netočivých složek proudů v jednotlivých vývodech. Překročí-li netočivé napětí vlivem poruchy přednastavenou hodnotu, začnou se porovnávat amplitudy netočivých složek proudů jednotlivých vývodů. Jako postižené vedení je označeno to, jehož amplituda je maximální. Nevýhodou je nízká citlivost a nutnost velmi přesného měření netočivé složky proudu, obzvláště v případech, kdy nastává vysoko-impedanční zemní spojení nebo se kapacita postiženého vývodu blíží celkové kapacitě soustavy [4].

Porovnávání fáze netočivé složky proudu

Metoda porovnává fáze netočivých složek proudů jednotlivých vývodů. Netočivá složka proudu postiženého vývodu má opačnou fázi než netočivé složky nepostižených vývodů. Tato metoda není příliš citlivá, pokud síť obsahuje velmi krátká vedení a komplikace mohou způsobit i proudová nesymetrie nebo vysoko-impedanční zemní spojení [4].

Zvýšení přesnosti můžeme docílit kombinací této metody s prvně zmíněnou metodou. Nejprve se uplatní první metoda, tedy vybereme ty vývody, které vykazují nejvyšší amplitudu netočivé složky a u těchto vybraných vývodů poté provedeme srovnání fáze netočivé složky. Vývod s opačnou fází netočivé složky proudu je označen jako postižený. Pokud mají všechny vývody stejnou fázi, pak se porucha nachází v rozvodně. Pokud dojde k vysoko-impedančnímu zemnímu spoji v soustavě, která obsahuje vedení krátkých délek, nelze se stoprocentně spoléhat ani na tuto metodu a může dojít k chybnému označení postiženého vývodu [4].

Určení toku netočivé složky jalového výkonu

Vyskytne-li se na vývodu zemní spojení, předbíhá netočivá složka napětí netočivou složku proudu o 90° . Je-li vývod v pořádku, pak se naopak opoždí o 90° . Touto metodou se vyhodnocuje tok jalového výkonu, konkrétně jeho znaménka. Je-li znaménko jalového výkonu záporné, vývod se označí jako postižený, je-li kladné, je vývod nepostižený. Výhodou tedy je, že není třeba výkon porovnávat s ostatními vývody, ale problém se správnou lokalizací u poruch s malým netočivým proudem přetrvává [4].

Metoda maximální změny jalové složky netočivého proudu

V bezporuchovém stavu se pro jednotlivé vývody vybere referenční signál netočivé složky proudu společně s fázovým posunem netočivé složky napětí a po vzniku zemního spojení se vyhodnotí jejich změna. Postižený vývod je ten, u něhož byla změna jalové složky netočivého proudu maximální. Proudová nesymetrie omezuje selektivitu této metody [4].

Tyto čtyři metody nelze použít v kompenzovaných soustavách, kvůli kompenzace kapacitního proudu [4].

5.1.2. Metody pro kompenzované soustavy

Metoda detekce činné složky netočivého proudu (Wattmetrická metoda)

Poruchový proud nelze zcela vykompenzovat a vždy tak přetrvává zbytkový proud činného charakteru. Této skutečnosti využívá Wattmetrická metoda, která používá směr tohoto proudu k lokalizaci poruchy. U postiženého vývodu je činná složka netočivého proudu popřípadě činný výkon netočivé složky vyšší a má opačný směr než u ostatních nepostižených vývodů. Zásadní vliv na správnou funkci metody mají dobře navržené měřicí proudové transformátory a velikost činné složky netočivého proudu. Právě rozdílné chyby fáze a úhlu použitých PTP vzhledem k nízké úrovni reziduálního proudu (3 % – 10 % kapacitního proudu sítě) mohou zapříčinit neselektivní působení metody. Pro zvýšení úrovně činné složky netočivého proudu a tedy pro zvýšení citlivosti zemních ochran se nejen v České republice využívá krátkodobého připnutí pomocného odporu. Příklad charakteristiky detekující činnou složku netočivého proudu je zobrazen na Obr. 5.1. Jelikož se distribuční soustava běžně nemusí provozovat zcela vykompenzovaná, ale může být mírně rozladěná, má netočivá složka proudu fázový posun dle charakteru provozu systému, jak je naznačeno na tomto obrázku [4].

Admitanční metoda netočivé složky

Metoda je založena na nepřetržitém sledování netočivé složky proudu \bar{I}_0 a napětí \bar{U}_0 , kde se při překročení přednastavené hodnoty netočivé složky napětí provede výpočet admitance podle vztahu

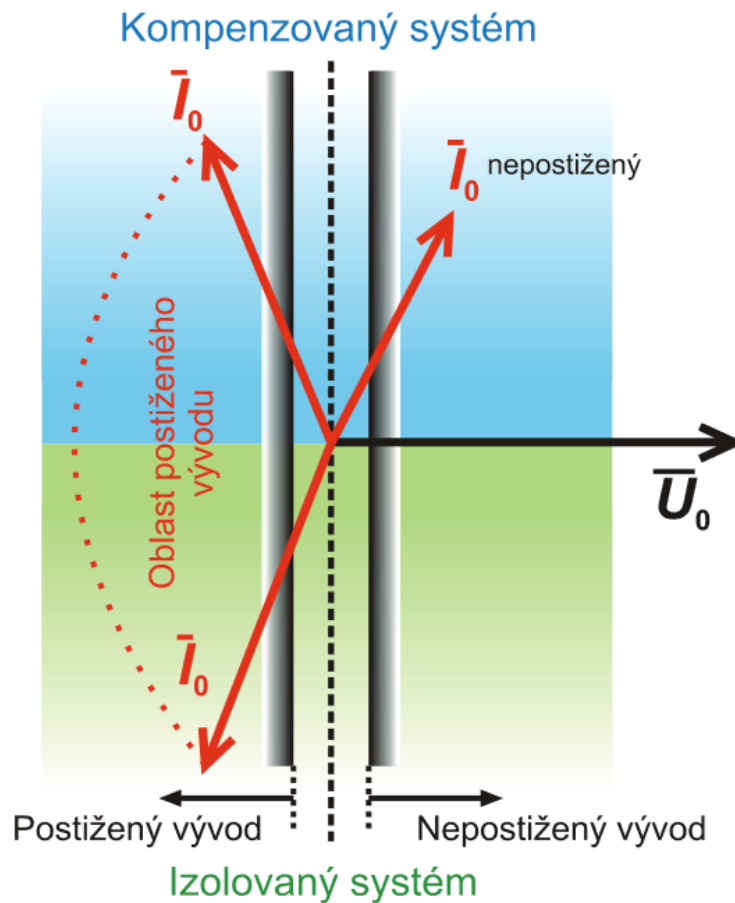
$$\bar{Y}_0 = \frac{\bar{I}_0}{-\bar{U}_0} \text{ [S]} [4] \quad (5.1)$$

Aby se omezilo selhání metody vlivem nesymetrie systému, používá se častěji pro vyhodnocení admitance přírůstkové metody. Admitance je v tomto případě vypočtena z poměru přírůstku netočivého proudu a napětí mezi stavem před poruchou (prefault) a při poruše (fault)

$$\bar{Y}_0 = \frac{(\bar{I}_{0_fault} - \bar{I}_{0_prefault})}{-(\bar{U}_{0_fault} - \bar{U}_{0_prefault})} = \frac{\Delta \bar{I}_0}{-\Delta \bar{U}_0} \text{ [S]} [4] \quad (5.2)$$

V případě nepostiženého vývodu je výsledná admitance rovna celkové admitanci chráněného vývodu \bar{Y}_{vyv} a má v daném případě záporné znaménko

$$\bar{Y}_0 = -\bar{Y}_{vyv} = -(G_{vyv} + jB_{vyv}) \text{ [S]} [4] \quad (5.3)$$



Obr. 5.1: Příklad charakteristiky wattmetrického článku [4]

V praxi díky malým úrovním složek \bar{I}_0 a \bar{U}_0 , a tedy nepřesnosti při výpočtu výsledné admitance však může mít i vypočtená konduktance G_{vyv} i kladné znaménko. Podobně i vypočtená susceptance B_{vyv} může dosahovat kladné hodnoty vlivem chyby měření nebo v případě decentrální kompenzace či při provozu systému v podkompenzovaném stavu. Následující vztah vyjadřuje stav, který indikuje postižený vývod:

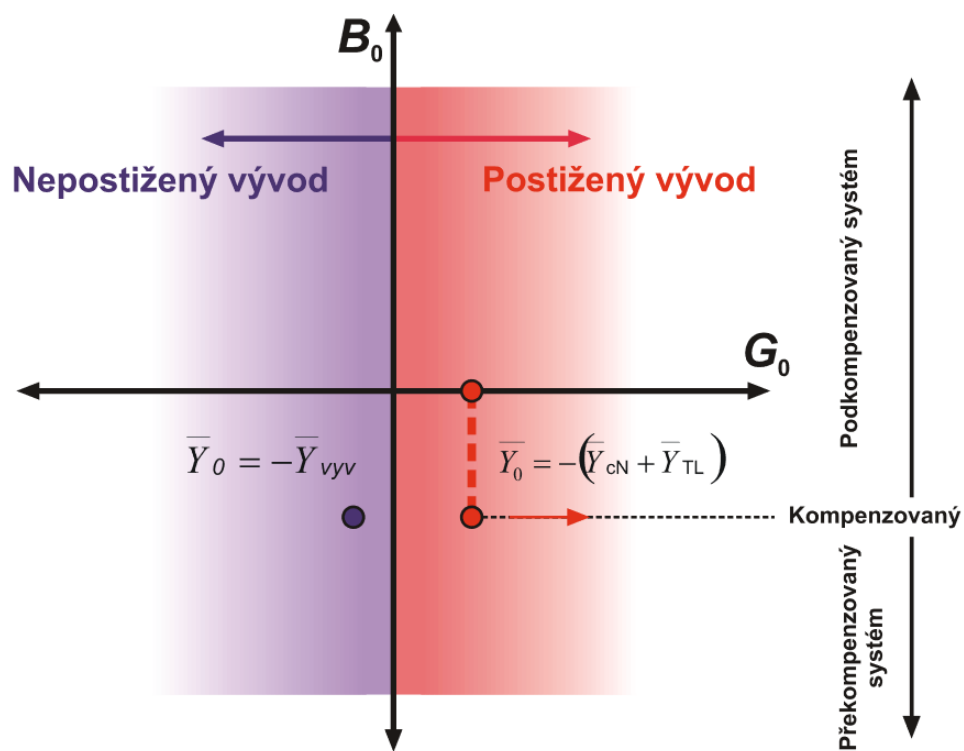
$$\bar{Y}_0 = -(\bar{Y}_{cN} + \bar{Y}_{TL}) [S] [4] \quad (5.4)$$

\bar{Y}_{cN} celková admitance nepostižených vývodů [S]

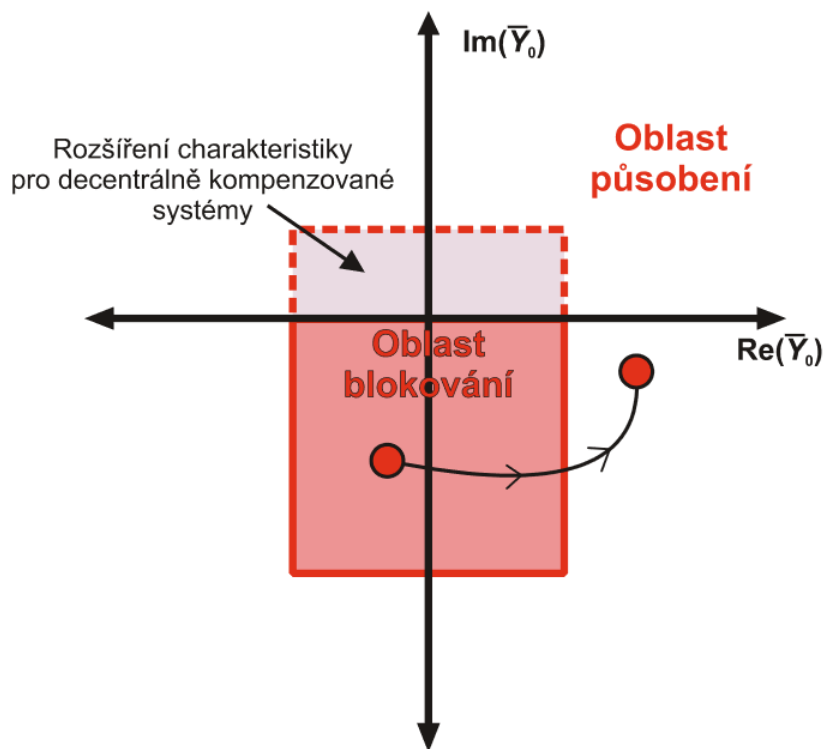
\bar{Y}_{TL} admitance zhášecí tlumivky [S]

Výsledná netočivá konduktance vycházející z předchozího vzorce má v praktických případech kladné znaménko, kdežto znaménko susceptance je v tomto případě závislé na stupni kompenzace soustavy. Způsob funkce této admitanční metody je nastíněn na Obr. 5.2.

Zařízení užívající admitanční metody využívají podobné pracovní charakteristiky jako distanční ochrany, ale zásadním rozdílem mezi nimi je, že pokud je vypočtená admitance uvnitř admitanční charakteristiky, jedná se o nepostižený vývod (nepostižený úsek) a popud je blokován, pokud se admitance dostane vně pracovní charakteristiky (dojde k překročení hranice) dojde k popudu a vývod je označen jako postižený. Tuto funkci znázorňuje Obr. 5.3 [4].



Obr. 5.2: Způsob funkce admitanční metody [4]



Obr. 5.3: Příklad pracovní charakteristiky admitanční metody [4]

Admitanční metoda využívající násobky základní harmonické

Pro zvýšení citlivosti admitanční metody lze při vyhodnocení netočivé složky proudu a napětí využívat násobků základní harmonické, a to zejména 5. harmonické, která je většinou nejvíce zastoupena v poruchovém (kapacitním) proudu a není kompenzována zhášecí tlumivkou. Při aplikaci této metody se provede výpočet a vyhodnocení admitance pouze pro tuto frekvenční složku, kdy se systém chová jako nekompenzovaný. V některých případech lze využít pro vyhodnocení sumace vypočtených admitancí základní harmonické a ostatních frekvenčních složek, které jsou výrazně zastoupeny v poruchovém proudu – 3., 5. a 7. harmonické [4].

Admitanční metoda v okružní síti

Principu admitanční metody lze využít také v případě sítí, které se provozují nebo je lze provozovat jako okružní. U sítí, které jsou v bezporuchovém stavu provozovány jako radiální, je nutné po vzniku zemního spojení síť „zkruhovat“ a sledovat přerozdělení netočivé složky proudu. V tomto případě se netočivá složka proudu vlivem vytvořené smyčky přerozdělí mezi obě paralelní větve dle jejich impedancí (admitancí), na základě čehož lze definovat místo poruchy. Zvýšení citlivosti této metody lze dosáhnout archivací vystopovaných zemních spojení s příslušnými poměry admitancí. V případě vzniku zemního spojení se pak porucha lokalizuje v místě s podobným poměrem zaznamenané admitance. U sítí, které jsou v bezporuchovém stavu provozovány jako okružní, dojde po vzniku zemního spojení ke krátkodobému připojení pomocné kapacity k výkonovému vinutí zhášecí tlumivky. Pro určení místa poruchy se během této operace monitoruje změna netočivé složky proudu před a po připojení této kapacity a na základě přerozdělení přírůstku netočivé složky proudu se definuje místo poruchy [4].

Konduktanční metoda

Metoda je principem podobná admitanční metodě. Zásadním rozdílem je však to, že k detekci směru poruchy se vyhodnocuje pouze konduktance vypočtená z netočivé složky proudu a napětí [4]:

$$\begin{aligned} \text{pro postižený vývod: } G_0 &= \operatorname{Re} \left[\frac{\bar{I}_0}{\bar{U}_0} \right] = -(G_{cN} + G_{TL}) [S] [4] \\ \text{a pro nepostižený vývod: } G_0 &= \operatorname{Re} \left[\frac{\bar{I}_0}{\bar{U}_0} \right] = (G_{vyv}) [S] [4] \end{aligned} \quad (5.5)$$

G_{cN} netočivá konduktance respektující svod zbývajících nepostižených vývodů [S]

G_{TL} netočivá konduktance odpovídající ekvivalentu zhášecí tlumivky [S]

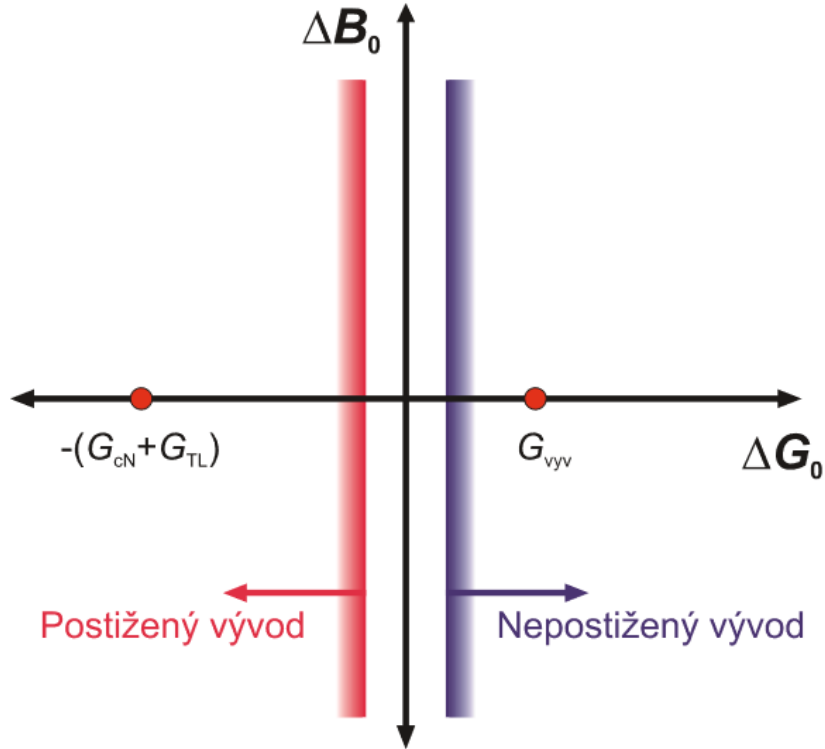
G_{vyv} netočivá konduktance chráněného vývodu [S]

Konduktanční metoda s měřením přírůstku

Výhoda této metody je ve vyhodnocování změny netočivé složky proudu $\Delta \bar{I}_0$ a napětí $\Delta \bar{U}_0$ mezi stavem před a po vzniku poruchy, čímž odpadají problémy způsobené vlivem nesymetrie systému a chybou měření PTP. Metodika výpočtu konduktance z hodnot těchto přírůstků je obdobná jako u konduktanční metody, kde postižený a nepostižený vývod je vyjádřen vztahy:

$$\begin{aligned} \text{pro postižený vývod: } \Delta G_0 &= \operatorname{Re} \left[\frac{\Delta \bar{I}_0}{\Delta \bar{U}_0} \right] = -(G_{cN} + G_{TL}) [S] [4] \\ \text{a pro nepostižený vývod: } \Delta G_0 &= \operatorname{Re} \left[\frac{\Delta \bar{I}_0}{\Delta \bar{U}_0} \right] = (G_{vyv}) [S] [4] \end{aligned} \quad (5.6)$$

Pro určení směru poruchy porovnává metoda přírůstky konduktance ΔG_0 (reálnou část poměru přírůstku netočivého proudu k přírůstku netočivého napětí s kladnou a zápornou prahovou hodnotou. Předvedeno je to na Obr. 5.4 [4].



Obr. 5.4: Pracovní charakteristika přírůstkového konduktančního článku [4]

Dobré výsledky tato metoda dosahuje zejména v kombinaci s automatikou připínání pomocného odporu. Velkou výhodou je v tomto případě selektivní nastavení popudové hodnoty konduktance postiženého vývodu pro dobrou citlivost a spolehlivost konduktančních ochran. V případě kombinace automatiky připínání pomocného odporu s konduktanční ochranou je nastavena jedna popudová hodnota konduktance, a to dle konduktance zvoleného pomocného odporu G_{Rp} . Jak bylo popsáno dříve, v případě připnutí pomocného odporu vzroste naměřená netočivá konduktance postiženého vývodu nad hodnotu, která je rovna minimálně konduktanci pomocného odporu. Pro postižený vývod tedy bude platit

$$\begin{aligned} \Delta G_0 &= \operatorname{Re} \left[\frac{\Delta \bar{I}_0}{\Delta \bar{U}_0} \right] = -(G_{cN} + G_{TL} + G_{Rp}) \cong -G_{Rp} [S] [4] \\ |G_{Rp}| &\gg |G_{vyv}| [4] \end{aligned} \quad (5.7)$$

U nás běžně rozšířené konduktanční ochrany pracují ve spolupráci s automatikou pomocného odporníku, kdy během času připnutí odporníku vyhodnocují absolutní hodnotu konduktance postiženého vývodu [4].

Metoda vyšších harmonických

Hlavní význam zhášecí tlumivky v neúčinně uzemněných sítích je kompenzace základní harmonické poruchového proudu, avšak díky nelineárním spotřebičům obsahuje kapacitní proud také násobky základní harmonické, které nejsou kompenzovány. Úroveň těchto harmonických zejména řádu 3., 5. a 7. je převážně v městských distribučních sítích značně vysoká a v mnoha případech jejich součet převyšuje úroveň základní harmonické zbytkového proudu. Právě této „nedokonalé“ kompenzace kapacitního proudu využívá metoda vyšších harmonických k indikaci poruchy. Metoda využívá detekce těchto řádů harmonické a vyhodnocuje signály dané jejich sumací, čímž se dosáhne maximální citlivosti. Jako postižený je indikován vývod s maximální úrovní tohoto signálu. V některých případech je sledovanou pouze 5. harmonická, kde se vyhodnocuje nejen úroveň tohoto signálu, ale i jeho fáze. Postižený vývod má pak maximální úroveň této složky a opačnou fázi vůči nepostiženým vývodům. Přesnost metody je závislá zejména na přesnosti měření, provedené frekvenční analýze a také na úrovni těchto složek ve sledované soustavě. Podobného principu se využívá i u metod založených na vyhodnocování signálu HDO.

Citlivost výše zmiňovaných metod vycházejících z vyhodnocení signálů až po ustálení přechodového děje není zpravidla tak velká, jako v případě metod, které jej využívají. Zásadní vliv na tento fakt má zhášecí tlumivka, která v ideálních případech zcela kompenzuje kapacitní zemní proud vyvolaný zemním spojením. Proto se může stát, že v některých případech je změřená netočivá složka proudu u nepostiženého vývodu vyšší než netočivá složka proudu postiženého vývodu, což vede k chybné lokalizaci a špatné účinnosti metody. Právě díky schopnosti detekovat i krátkodobá zemní spojení a dobré citlivosti došlo v poslední době k velkému rozšíření dynamických metod, a to zejména v oblasti indikátorů poruch umožňujících lokalizovat směr poruchy uvnitř distribučních sítí [4].

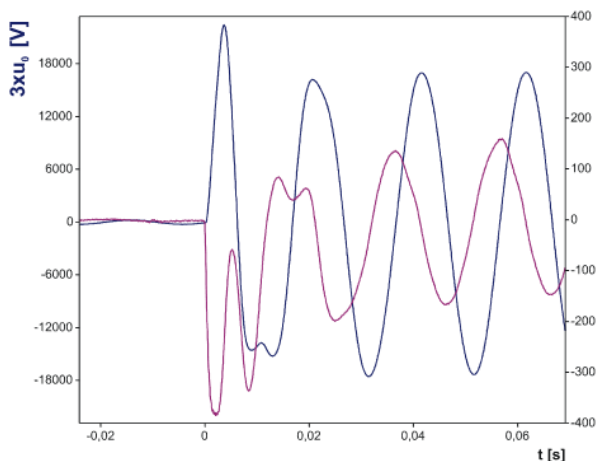
5.2. Dynamické metody

Metody spadající do této kategorie využívají přechodný jev zapříčiněný vznikem zemního spojení. Jsou rozšířeny zejména v kompenzovaných sítích, kde díky vyšší citlivosti nahrazují statické metody. Jejich nevýhodou je většinou pouze jeden pokus pro korektní lokalizaci poruchy [4].

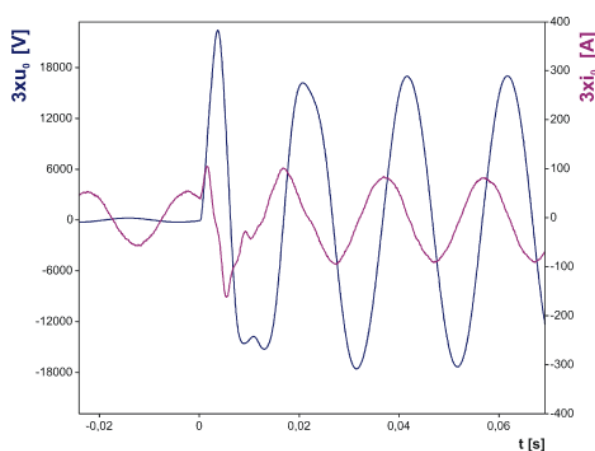
Metoda první půl-periody

Využívá krátkého intenzivního přechodového děje, který nastane při vzniku zemního spojení. Tento děj způsobí vybití kapacity postižené fáze a nabití kapacit nepostižených fází v celé soustavě. Výsledkem je krátce trvající vybíjecí proud, jehož vliv se odráží v netočivých složkách napětí a proudu. Metoda tedy porovnává oscilografické průběhy netočivých složek bezprostředně po vzniku poruchy. Jako nepostižený vývod či poruchu před místem měření (ve směru od napáječe) označí metoda stav, kdy je během první půl-periody od vzniku zemního spojení netočivá složka proudu a napětí ve fázi (Obr. 5.6). Naopak jako postižený vývod nebo poruchu za místem měření (ve směru od napáječe) se označí ta část, kde je naměřená složka netočivého proudu a napětí v protifázi (Obr. 5.5). Výhodou této metody je její využití v kompenzovaných neúčinně uzemněných sítích, kde dobře lokalizuje i oblouková zemní spojení. Její nevýhodou je krátký časový interval pro korektní vyhodnocení či nemožnost lokalizace vysokoimpeanční

poruchy, která potlačuje zmiňovaný transientní jev. Na Obr. 5.5 a Obr. 5.6 je zobrazen záznam přechodného jevu během vzniku zemního spojení, kde je patrné vyhodnocení postiženého a nepostiženého úseku [4].



Obr. 5.5: Oscilografický průběh netočivé složky proudu a napětí při zemním spojení na postiženém vedení [4]



Obr. 5.6: Oscilografický průběh netočivé složky proudu a napětí při zemním spojení na nepostiženém vedení [4]

Metoda qu – diagramu

Tato metoda vyhodnocuje grafickou závislost netočivé složky proudu (představující náboj q_0) na netočivé složce napětí. Vybíjecí proces nepostiženého vedení lze popsat rovnicemi

$$u_0(t) = u_0(t_0) + \frac{1}{C_{eq}} \int_{t_0}^t i_0(\tau) d\tau \quad [V][4] \quad (5.8)$$

$$u_0(t) = u_0(t_0) + \frac{q_0(t)}{C_{eq}} \quad [V][4]$$

t_0 čas vzniku zemního spojení [s]

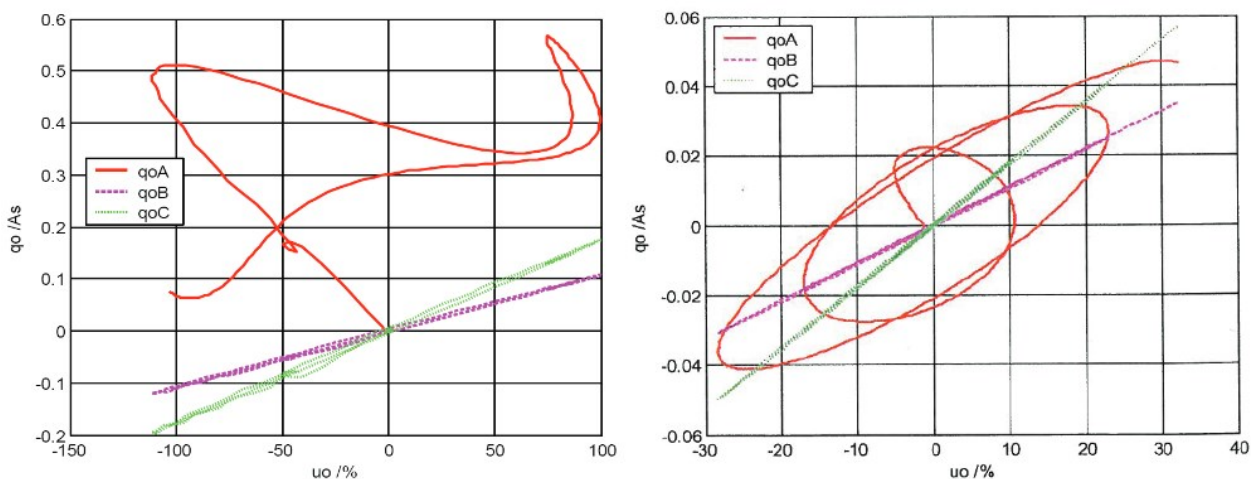
C_{eq} ekvivalentní kapacita mezi vodičem a zemí všech nepostižených vedení v celé síti [F]

i_0 okamžitá hodnota netočivé složky proudu procházející sledovaným nepostiženým vedením [A]

Předpokládá-li se, že v momentě vzniku zemního spojení je okamžitá hodnota netočivé složky napětí nulová, pak výsledná závislost netočivé složky napětí na netočivé složce náboje v případě nepostiženého vedení je lineární podle následujícího vztahu

$$u_0(t) = \frac{q_0(t)}{C_{eq}} \quad [V][4] \quad (5.9)$$

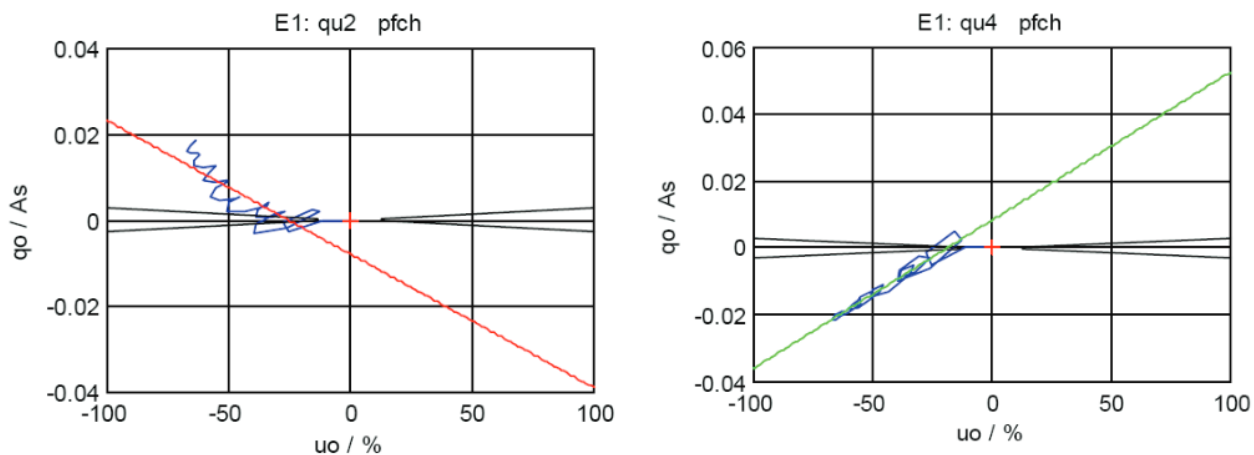
V případě postiženého vedení tato rovnice ale neplatí, jelikož vybíjecí proud postiženého vývodu má opačný směr, než je tomu u vývodu nepostižených. V tomto případě bude qu – diagram začínat s opačným gradientem a u kompenzovaných sítí (vlivem zhášecí tlumivky) nebude tato závislost lineární. Příklad je uveden na Obr. 5.7 [4].



Obr. 5.7: Příklad q_u – diagramu tří vývodů v případě nízkoodporové poruchy na vývodu q_0A (q_0B a q_0C nepostižené) [4]

Metoda q_u2 – diagramu

Jedná se o zdokonalenou metodu q_u – diagramu, která pro zvýšení citlivosti filtruje část netočivé složky proudu a napětí, která je způsobená nesymetrií systému či nelinearitou zátěží. Z celého frekvenčního spektra jsou tedy odfiltrovány netočivé složky napětí a proudu obsažené v bezporuchovém stavu, tak aby bylo možné vyhodnocovat průběhy složek vyvolaných pouze nesymetrií poruchy. Nedochází tedy ke zkreslení výsledné q_u2 charakteristiky a lze proto snadněji určit její gradient, jak lze vidět na Obr. 5.8 [4].



Obr. 5.8: q_u2 – diagram si korektní identifikací postiženého vývodu q_u2 a nepostiženého vývodu q_u4 [4]

Vyhodnocení částečných výbojů pro lokalizaci poruchy

Poruchu vyhledává pomocí sledování impulzních složek signálů částečných výbojů vznikajících na povrchu zasaženého vodiče. Pokud je signál vhodně filtrován, lze rozeznat jednopólové poruchy způsobené pádem vodiče na zem nebo poškození pádem stromu či větve stromu na povrch vodiče. Metoda se využívá zejména na indikaci poruchy uvnitř izolovaných vysokonapěťových vodičů venkovních vedení, kde je problém s detekcí zemního spojení obzvláště obtížný kvůli dobrým izolačním vlastnostem závěsného vodiče [4].

5.3. Lokalizace poruchy

Základním krokem k rychlé lokalizaci poruchy je úspěšná identifikace postiženého vývodu na základě výše popsaných prostředků. Veškeré další operace a vyhodnocení jsou pak zaměřeny pouze na tento postižený vývod [4].

Odpínání úseků postiženého vývodu

Jeden z nejeftivnějších prostředků, které se dodnes používají. Spočívá v postupném odpínání úseků či odboček postiženého vývodu do doby, než dojde k vypnutí (odpojení) poruchy. Když je vadný úsek nalezen, je do jeho oblasti povolána technická obsluha. Metoda je u nás nejrozšířenější a nejpoužívanější, protože neexistuje adekvátní náhrada, která by dokázala jednoznačně vymezit poruchu uvnitř postižené soustavy. Metoda je však velmi náročná na dispečery a často vyžaduje přerušování dodávky elektrické energie, proto je snaha tuto metodu postupně nahrazovat metodami sofistikovanějšími [4].

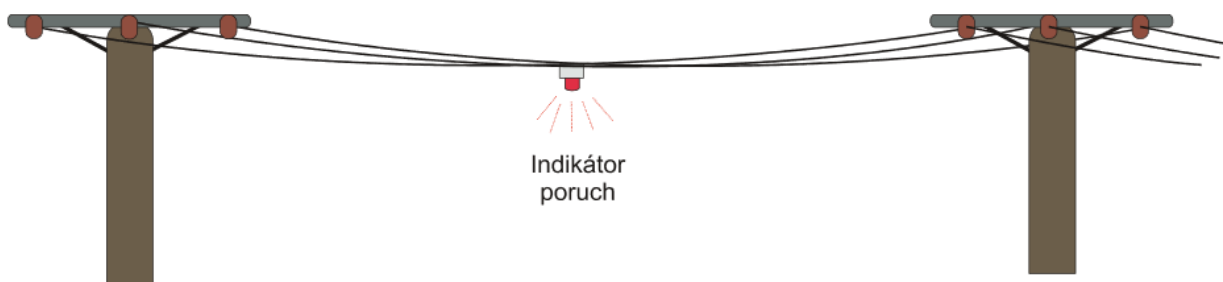
Spojování postiženého vývodu do kruhu

Jednodušší metodou je spojení postiženého a nepostiženého vývodu do kruhu, což způsobí přerozdělení netočivé složky proudu a na základě tohoto přerozdělení se provede výpočet místa poruchy. Ne vždy však jde tyto vývody vycházející ze stejné přípojnice propojit do kruhu. Dalším problémem, který zamezuje širšímu využití této metody je homogenita parametrů vedení, kde díky velké členitosti úseků s rozdílnými parametry a konfigurací je jen velmi obtížné a někdy i nemožné vytvořit korektní model vedení. Přesná lokalizace je dále ztěžována i nestálostí jednotlivých parametrů vlivem povětrnostních vlivů a ročního období [4].

Indikátory poruch pro venkovní vedení

Nedokonalosti výše zmíněných metod vedly k vývoji v oblasti indikátorů poruch. Jsou to zařízení, která umožňují na základě sledování napěťových a proudových poměrů indikovat směr poruchy. Nejčastěji využívají charakteristických změn netočivých složek proudu a napětí nebo napěťových a proudových poměrů fázových vodičů. Využívají algoritmy vycházející z doposud známých metod statických a dynamických, a pro zvýšení citlivosti je i kombinují. Nejrozšířenější a nejvíce užívané jsou indikátory monitorující elektrické a magnetické pole chráněného vedení. Jejich instalace je snadná a možná v libovolném místě sítě bez přerušování dodávky elektrické energie a bez výrazného technického omezení.

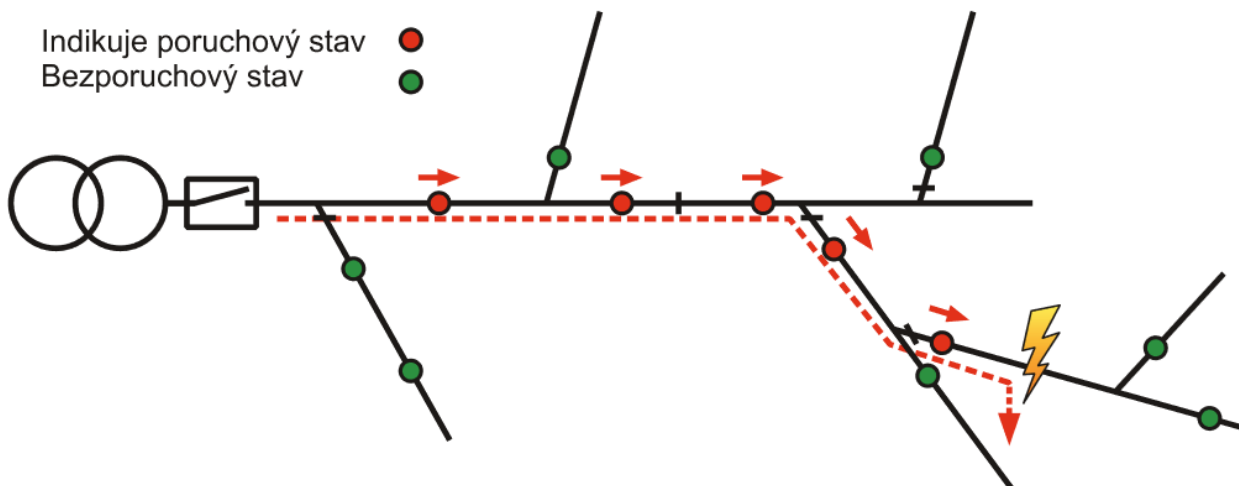
Podle počtu senzorů dělíme indikátory do dvou kategorií, a to na indikátory snímající celkové elektrické a magnetické pole, a indikátory snímající na jednotlivých fázích. Indikátory spadající do první kategorie mají pouze jeden snímač a měří sumaci elektrických a magnetických polí všech tří fázových vodičů. Výhodou jsou malé rozměry, snadná instalace, nižší cena a menší spotřeba elektrické energie, ale jsou méně citlivé. Poruchové stavy jsou indikovány za pomoci rozpínacích kontaktů relé, optickou signalizací (blikáním signalizačního světla), dálkovou komunikací s dispečinkem nebo indikačními terčíky s magnetickou pamětí. Napájení lze řešit buď akumulátorovou baterií, fotovoltaickým článkem nebo přímo z vedení. Příklad konstrukčního řešení je zobrazen na Obr. 5.9 [4].



Obr. 5.9: Indikátor poruch ukotvený k fázovému vodiči [4]

Princip lokalizace poruch indikátory

Dle směrovosti indikátorů poruch a znalosti topologie sítě lze definovat postižený úsek. Místo poruchy se dohledá stopováním indikátorů indikujících poruchové vedení (červená signalizace) až do místa zemního spojení. Zelená signalizace indikuje bezporuchový stav vedení nebo úseku. Pokud je indikátor vybaven dálkovou signalizací, lze postižený úsek vytipovat předem, což umožní vyslat techniky přímo k tomuto místu. Pokud toto není součástí vybavení a indikátor má pouze optickou signalizaci, je třeba aby obsluha stopovala indikátory podél vedení až do místa poruchy. Obr. 5.10 popisuje princip této signalizace [4].



Obr. 5.10: Lokalizace místa zemního spojení pomocí signalizace indikátoru poruch [4]

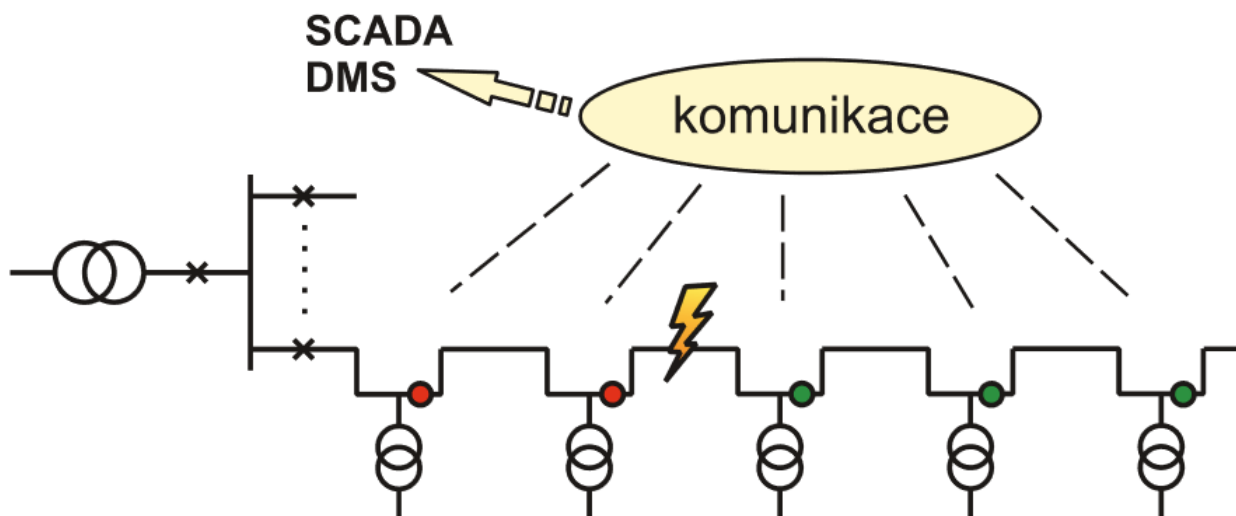
Mobilní indikátor poruchy

Mobilní indikátory ARCNOL se využívají v Lotyšsku a jejich funkce je založená na snímání elektromagnetického pole a vyhodnocování směru poruchy pomocí metody vyšších harmonických. Nejprve se zjistí, které vedení je postižené a pak je k tomuto vedení vyslána obsluha, která pochůzkou podél vedení „stopuje“ místo poruchy [4].

Indikátory poruch pro kabelová vedení

Jednodušší a přesnější měření netočivé složky proudu propůjčuje těmto indikátorům jednodušší konstrukci a větší citlivost než u indikátorů pro venkovní vedení. Na Obr. 5.11 je ukázán koncept užívaný ve finské kabelové síti. V tomto případě se využívají víceúčelové monitory nasazené uvnitř jednotlivých

distribučních stanic pro měření oteplení transformátoru a napětových i proudových poměrů na nn. Pro lokalizaci zemního spojení je do jednotky dodatečně přivedeno měření z průvlekového transformátoru proudu umístěného na průběžném kabelovém vedení primární strany distribučního transformátoru. Jednotka vyhodnocuje úroveň netočivé složky proudu (metoda vyšších harmonických). Stopováním stavu indikátorů je pak nalezeno místo poruchy.



Obr. 5.11: Princip lokalizace pomocí indikátoru poruch v kabelové síti [4]

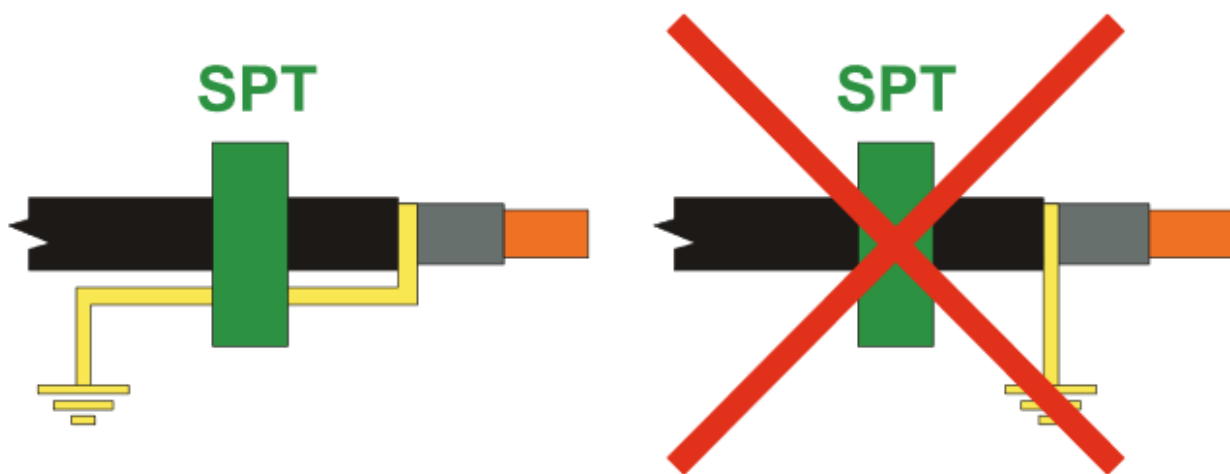
5.4. Detekce a lokalizace poruchy v sítích uzemněných přes odporník

Ve složitých kabelových sítích se využívá indikátorů poruch, podobně jako v kompenzovaných sítích. Jelikož tato zařízení indikují průchod zkratového proudu fázovým vodičem v soustavách vn, mluvíme o indikátorech zkratového proudu (IZP). Jedná se o třífázové měřicí zařízení, které vyhodnocuje proud každé fáze nezávisle. Pokud tento monitorovaný proud překročí popudovou hodnotu a čas zpoždění, dojde k indikaci poruchy. Díky indikaci průchodu poruchového proudu obsluze usnadní rychlé dohledání místa poruchy uvnitř složitých kabelových sítí a zkracuje tak dobu beznapětové pauzy. Princip lokalizace je velmi podobný jako u kompenzovaných soustav, zobrazen na Obr. 5.10.

IZP se skládá ze dvou základních částí, a to z vlastní jednotky IZP a ze tří snímacích transformátorů proudu (SPT). Tyto tři transformátory jsou instalovány na jednotlivé fáze L1, L2 a L3 a poskytují měřený signál vlastní jednotce IZP. Pro jednoduchou instalaci jsou tyto transformátory obvykle konstruovány s děleným jádrem, aby nemuselo být měřené vedení rozpojováno. Nastaví se vybavovací hodnota a trvá-li tento stav nepřetržitě po tuto dobu, jsou iniciovány indikační prvky postižené fáze. Napájení indikátoru je buď ze soustavy nn nebo je zajištěno SPT, které energii odebírají z kontrolovaného obvodu. Pro indikaci nevyžadují tyto indikátory potřebný odběrový proud v chráněném kabelu, jelikož si energii potřebnou ke své funkci odebírají přímo ze zkratového proudu. Pro optimalizaci funkce indikátoru je k dispozici popudová (vybavovací) hodnota proudu a vybavovací doba indikátoru.

Mimo jiné je třeba dbát zejména na korektní instalaci měřicích transformátorů. Je nutné kompenzovat proud procházející stíněním, aby nedošlo ke zkreslení měřeného proudu. Toho se dosáhne

zpětným provlečením stínění skrz měřicí transformátor tak, aby tento transformátor měřil pouze proud procházející jádrem monitorovaného kabelu, jak je naznačeno na Obr. 5.12 [4].



Obr. 5.12: Správná a chybná instalace měřicího transformátoru proudu na kabelové vedení [4]

6. Výpočet

Zemní spojení v kabelové síti

Vypočtete velikost poruchového proudu v kabelové síti 35 kV a pro kompenzaci zemních kapacitních proudů navrhnete a) odporník, b) tlumivku. Délka sítě je $l = 40$ km, druh použitého kabelu je 35-AXEKCY o průřezu 150 mm^2 .

Tab. 6.1: Katalogová data použitého kabelu [7]

35-AXEKCY 20/35 (40,5) kV

Technická data | Technical data



Počet žil x průřez jádra (mm ²)	Průměr nad izolací (mm)	Celkový průměr (cca) (mm)	Váha (cca) (kg/100 m)	Standardní dodací délka (m)	Standardní velikost bubnu
Number of cores x cross-section of conductor (mm ²)	Diameter over insulation (mm)	Overall diameter (approx.) (mm)	Weight (approx.) (kg/100 m)	Standard delivery length (m)	Standard drum size
1 x 150/25	31,6	40	180	500	K18

Elektrická data při +20 °C | Electrical data at +20 °C

Počet žil x průřez jádra (mm ²)	Odpor jádra max. (Ω/km)	Odpor stínění max. (Ω/km)	Indukčnost v troj- úhelníku/rovině* (mH/km)	Kapacita (μF/km)	Nabíjecí proud/fáze (A/km)
Number of cores x cross-section of conductor (mm ²)	Conductor resistance max. (Ω/km)	Screen resistance max. (Ω/km)	Inductance in trefoil/in plane* (mH/km)	Capacitance (μF/km)	Charging current/phase (A/km)
1 x 150/25	0,206	0,727	0,40/0,59	0,18	1,1

Kapacita kabelu vůči zemi:

$$C_k = 0,18 \text{ μF/km}$$

Celková kapacita sítě:

$$C = C_k \cdot l = 0,18 \cdot 40 = 7,2 \text{ μF}$$

Poruchový proud:

$$I_p = 3 \cdot \omega \cdot C \cdot U_f = 3 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 7,2 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{35 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 137,12 \text{ A}$$

a) Návrh tlumivky

Velikost indukčnosti tlumivky:

$$L_{T1} = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C} = \frac{1}{3 \cdot (2\pi \cdot 50)^2 \cdot 7,2 \cdot 10^{-6}} = 0,47 \text{ H}$$

Ověření kompenzačního proudu tekoucího tlumivkou:

$$I_{T1} = \frac{U_S}{\sqrt{3} \cdot \omega \cdot L_{T1}} = \frac{35 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 0,47} = 137,12 \text{ A}$$

Proud protékající tlumivkou se rovná proudu protékajícímu zemním spojením.

Výkon tlumivky:

$$S_{Tl} = I_p \cdot U_f = 137,12 \cdot \frac{35 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 2,77 \text{ MVA}$$

b) *Návrh odporníku*

Velikost odporu odporníku:

$$R_N < \frac{1}{3 \cdot \omega \cdot C} = \frac{1}{3 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 7,2 \cdot 10^{-6}} = 147,37 \, \Omega$$

Z řady E12 vyberu hodnotu, $R_N = 120 \, \Omega$.

Ověření kompenzačního proudu tekoucího odporníkem:

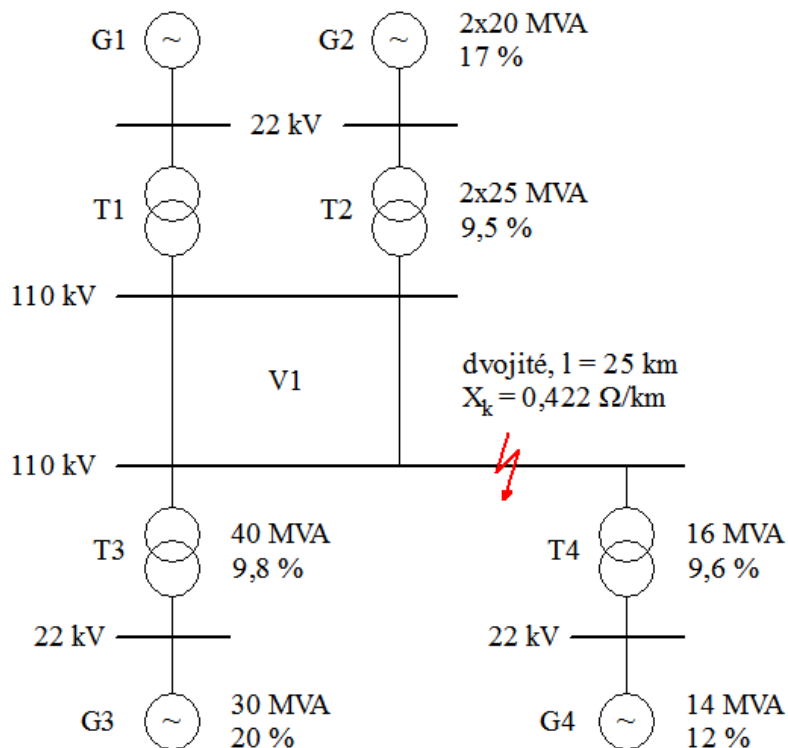
$$I_{RN} = \frac{U_f}{R_N} = \frac{35 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 120} = 168,39 \text{ A}$$

$$I_{RN} > I_p \rightarrow 168,39 \text{ A} > 147,37 \text{ A}$$

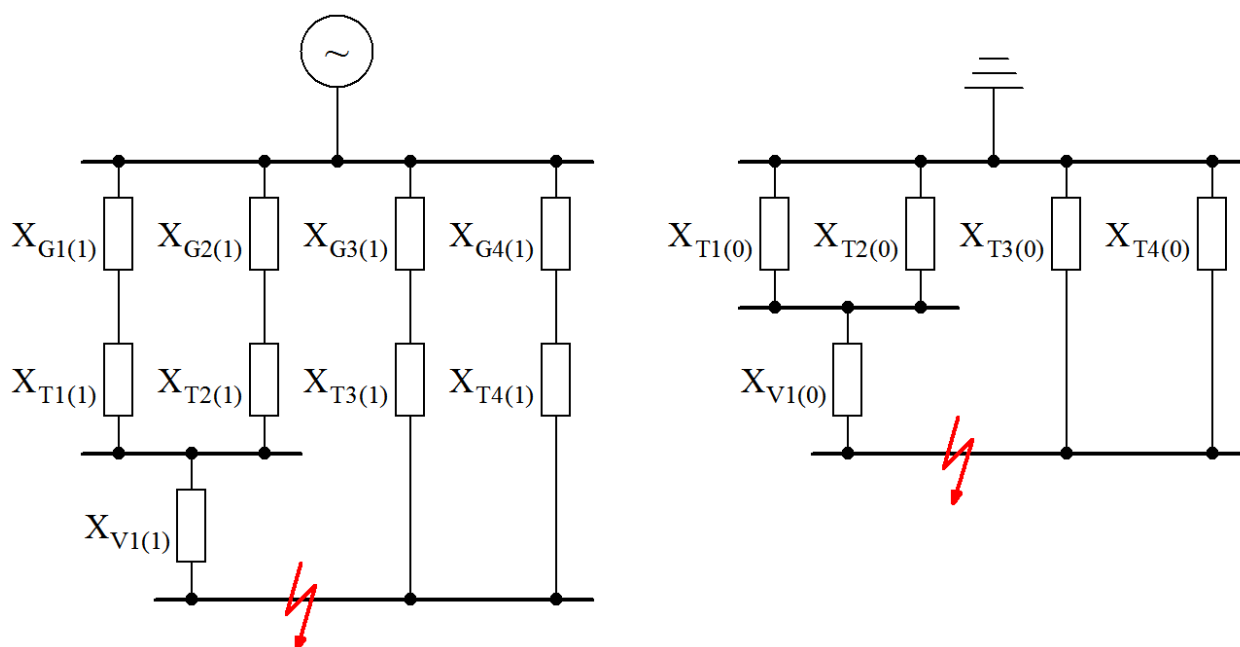
Proud protékající odporníkem je vyšší než proud zemního spojení, odporník tedy vyhovuje.

Jednofázový zkrat

Vypočtete počáteční rázový zkratový proud I_K'' při jednofázovém zkratu ve vyznačeném místě. Učiňte tak pro poměrné hodnoty. Vztažný výkon si zvolte $S_V = 80 \text{ MVA}$. Hodnoty jsou převzaty z tabulek v [8].



Obr. 6.1: Schéma řešené sítě



Obr. 6.2: Vlevo – náhradní schéma sousledné a zpětné složky, vpravo – náhradní schéma nulové složky
Sousledné a zpětné reaktance

Zpětná reaktance všech složek obvodu je stejná jako reaktance sousledná.

Alternátory:

$$x_{G1(1)} = x_{G2(1)} = \frac{x''_{d1} \cdot S_V}{S_{G1}} = \frac{0,17 \cdot 80}{20} = 0,680$$

$$x_{G3(1)} = \frac{x''_{d3} \cdot S_V}{S_{G3}} = \frac{0,20 \cdot 80}{30} = 0,533$$

$$x_{G4(1)} = \frac{x''_{d4} \cdot S_V}{S_{G4}} = \frac{0,12 \cdot 80}{14} = 0,686$$

Transformátory (T1, T2, T3, T4 – 110/22 kV Siemens):

$$x_{T1(1)} = x_{T2(1)} = \frac{u_{k1} \cdot S_V}{S_{T1}} = \frac{0,095 \cdot 80}{25} = 0,304$$

$$x_{T3(1)} = \frac{u_{k3} \cdot S_V}{S_{T3}} = \frac{0,098 \cdot 80}{40} = 0,196$$

$$x_{T4(1)} = \frac{u_{k4} \cdot S_V}{S_{T4}} = \frac{0,096 \cdot 80}{16} = 0,480$$

Vedení (V1 – 110 kV, dvojité AlFe, průměr 150 mm², stožár typu Soudek):

$$x_{V1(1)} = X_k \cdot l \cdot \frac{S_V}{2 \cdot U_S^2} = 0,422 \cdot 25 \cdot \frac{80 \cdot 10^6}{2 \cdot (110 \cdot 10^3)^2} = 0,035$$

Náhradní sousledná reaktance:

$$x_{(1)C} = \left(\frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{x_{G1(1)} + x_{T1(1)}} + \frac{1}{x_{G2(1)} + x_{T2(1)}}} + x_{V1(1)} + \frac{1}{x_{G3(1)} + x_{T3(1)}} + \frac{1}{x_{G4(1)} + x_{T4(1)}}} \right)^{-1}$$

$$x_{(1)C} = \left(\frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{0,680 + 0,304} + \frac{1}{0,680 + 0,304}} + 0,035 + \frac{1}{0,533 + 0,196} + \frac{1}{0,686 + 0,480}} \right)^{-1}$$

$$x_{(1)C} = x_{(2)C} = 0,242$$

Nulové reaktance

Předpokladem je, že transformátory mají nulovou reaktanci stejnou jako souslednou, transformátory jsou na straně zkratu spojeny do hvězdy a jejich uzly jsou uzemněny.

Nulová reaktance vedení V1 (dvojité vedení 110 kV s AlFe zemním lanem):

$$x_{V1(0)} = x_{V1(1)} \cdot 3,5 = 0,035 \cdot 3,5 = 0,122$$

Náhradní nulová reaktance:

$$x_{(0)C} = \left(\frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{x_{T1(0)}} + \frac{1}{x_{T2(0)}}} + x_{V1(0)} + \frac{1}{x_{T3(0)}} + \frac{1}{x_{T4(0)}}} \right)^{-1}$$

$$x_{(0)C} = \left(\frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{0,304} + \frac{1}{0,304}} + 0,122 + \frac{1}{0,196} + \frac{1}{0,480}} \right)^{-1}$$

$$x_{(0)C} = 0,092$$

Vztažný proud:

$$I_V = \frac{S_V}{\sqrt{3} \cdot U_V} = \frac{80}{\sqrt{3} \cdot 110} = 0,420 \text{ kA}$$

Počáteční rázový zkratový proud:

$$I''_{k1} = \frac{c \cdot 3 \cdot I_V}{x_{(1)C} + x_{(2)C} + x_{(0)C}} = \frac{1,1 \cdot 3 \cdot 0,420}{0,242 + 0,242 + 0,092} = 2,402 \text{ kA}$$

7. Závěr

Hlavní náplní bakalářské práce jsou poruchy, které se mohou vyskytnout v elektrizačních sítích. Práce je zaměřená na poruchy izolovaných a kompenzovaných soustav, které postihují jednu fázi. To jsou poruchy, u kterých nastane vodivé spojení jedné fáze se zemí. Je třeba rozlišovat zemní spojení a jednofázové zkraty, protože poruchový proud u zemních spojení je relativně malý a do určité hodnoty může být i tolerován, kdežto u zkratů je poruchový proud vždy mnohonásobně vyšší než proud provozní a je tedy schopný způsobit závažné škody.

Součástí rozboru těchto poruch jsou i metody kompenzace a lokalizace zemních spojení. Pro lokalizaci lze použít množství metod, které se dělí na statické a dynamické. Statické metody jsou spolehlivější díky skutečnosti, že po vzniku poruchy je lze opakovat do té doby, než je porucha dostatečně přesně lokalizována. Dynamické metody jsou zase citlivější, ale jak vyplývá z předchozí věty, po vzniku poruchy je nelze opakovat a máme tedy jen jeden pokus na přesnou lokalizaci. Mezi starší a poněkud nesofistikované metody patří například postupné odpojování úseků do doby, než je porucha nalezena, ale tento způsob má řadu nevýhod. Postupně se zavádějí moderní řešení využívající elektronické prvky, které jsou schopny plnit několik funkcí najednou, jako detekci místa poruchy i kompenzaci poruchových proudů.

V praktické části jsem názorně vypočetl poruchový proud při jednofázovém zkratu i při zemním spojení ve dvou různých sítích. Při zemním spojení jsem také navrhl dva způsoby kompenzace, pomocí odporů a pomocí tlumivky.

Literatura:

- [1] SANTARIUS, Pavel. *Elektrické stanice a vedení*. 1. vydání. Ostrava: VŠB, 1990. 215 s. ISBN 80-248-0175-2.
- [2] HODINKA, Miloslav, FECKO, Štefan, NĚMEČEK, František. *Přenos a rozvod elektrické energie*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1989. 328 s. ISBN 80-03-00065-3.
- [3] TROJÁNEK, Zdeněk, HÁJEK, Josef, KVASNICA, Pavol. *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1987. 312 s.
- [4] TOMAN, Petr a kol. *Provoz distribučních soustav*. 1. vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. 264 s. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [5] *Materiály z přednášek – 3. Přenos a rozvod* [online].
Dostupné z: https://www.powerwiki.cz/attach/PEL/2-PEL_PSaDS-2015.pdf [cit. 2016-12-14]
- [6] *Zemní spojení v trojfázových soustavách* [online].
Dostupné z: <https://www.powerwiki.cz/attach/ES/ZemniSpojeni.pdf> [cit. 2016-12-14]
- [7] *Kabely pro vysoké napětí* [online].
Dostupné z: <http://www.konex.sk/files/2015-04-29-140623-vn-katalog.pdf> [cit. 2017-4-26]
- [8] *Cvičení z elektroenergetiky* [online].
Dostupné z: https://feil.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/ee/Cviceni_z_elektroenergetiky.pdf [cit. 2017-4-27]